

均等色差空間に基づく色差式に関する研究
－CIELAB 色空間の均等色差空間への適用変換式の開発－

小松原 仁

目 次

第 1 章 序論	1
第 2 章 マンセル表色系の概要	8
2.1 序論	8
2.2 マンセル表色系の歴史	8
2.3 マンセル表色系の原理	8
2.4 結論	10
第 3 章 均等色差空間の必要性の背景	12
3.1 序論	12
3.2 CIE 色差式の利用状況と色差知覚	12
3.3 CIE 色差式の歴史と CIELAB 色差式の改良	14
3.4 XYZ 表色系及び CIELAB の原理	16
3.5 結論	20
第 4 章 CIELAB クロマスケールの補正関数	21
4.1 序論	21
4.2 CIELAB におけるマンセル表色系の隣接彩度間の色差	21
4.3 CIELAB クロマスケールの補正関数 $F(C)$ の導出	27
4.4 無彩色点に偏心が生じる原因	36
4.5 結論	40
第 5 章 修正クロマスケールを用いた色相スケールの補正関数	42
5.1 序論	42
5.2 隣接する色相差の色相角依存性	42
5.3 CIELAB 色相スケールの補正関数 $F(H)$ の導出	43
5.4 結論	51
第 6 章 均等色差空間と色差式	52
6.1 序論	52
6.2 メトリック色相差 (ΔH^*) のクロマの関係	52
6.3 色差属性と色差知覚との関係	53
6.4 均等色差空間を用いた色差式 (NCDF、NCDF-1 及び NCDF-2)	64
6.5 結論	67

第 7 章 開発した色差式の性能試験と色材産業への応用	68
7.1 序論	68
7.2 DUPON-DATASET による性能試験	68
7.3 ICD-DATASET による性能試験	80
7.4 WITT-DATASET による性能試験	92
7.5 色差観測データによる性能試験結果	98
7.6 結論	99
第 8 章 総合結論	100
謝 辞	103
付録 1 CIE94、CIEDE2000、MLAB 及び CMC(1:1)色差式	104
付録 2 修正クロマスケールを用いたマンセルグリッド	106

第1章 序論

日常生活で見聞きする色彩情報を交換する場合や、教育や医療分野で検討されている遠隔地相互間での色彩情報を正確に伝達するには、色を客観的に表示することが必要不可欠になる。色の表示方法は、表示可能な色数及び方法から次の3種類に分類することができる。

- 1) 色名による色の表示方法
- 2) カラーオーダシステム
- 3) CIE 表色系

色名による色の表示方法は、自然界に存在する生物や鉱物の色になぞらえて「桜色」、「鶯色」、「金色」のように表示する慣用色名と、文化人類学の研究者であるバーリンらが提唱している種々の言語で共通に使用されている基本色彩語である「白」、「黒」、「赤」、「黄」、「緑」、「青」などの単語に、「明るい」、「暗い」、「あざやか」、「くすんだ」といった修飾語を組み合わせた系統色名に分類される。慣用色名は、日常生活での会話に多く使用されているが、生物や鉱物の色になぞらえたり、共有する対象の色になぞらえたりするために経験や知識を共有することによって成立する。このため、不特定多数にかつ正確に伝達するには、おのずから表示可能な色数に限界が生じる。この欠点を補うために、日本語で使われている基本色彩語とほぼ同じ概念である基本色相名を用いた系統色名が使用されている。系統色名は、人間の視覚メカニズムの一つであるカテゴリカルな色の認知に基づいており、色名から共通の色を容易に想像することが可能なために、250色～300色程度までの色の表示に適しているとされている。しかし、デジタルカメラなど電子色彩記録媒体では数百万色以上の記録が可能であり、系統色名での色表示数では、記録された色を表示することができない。

カラーオーダシステムは、赤、黄、緑、青、紫などの色知覚を表示することができる表色系から系統的に選ばれた色を色票によって再現したもので、色票に表示された色記号によって表示する。我が国では、マンセル表色系に基づいた約1,900色からなるJIS準拠標準色票が普及している。この方法では、色票を製作する技術的及び経済的制約から6,000色～7,000色程度の標準色票が最も細密なものとされている。ただし、標準色票と内挿法や外挿法を用いて測定する視感比較方法を併用することによって100,000色程度の表示が可能で、製品の色指定に利用されている。しかし、標準色票の色数と視感による測定精度によって表示の精度が決まるため、ごくわずかに異なる2色の色差の表示には適していない。

これに対して、CIEXYZ表色系は、表示したい色と同じ色になるように、原色

と呼ばれる3種類の色光の混色比率を調節して得られた色光の混合比率（三刺激値：XYZという。）で表示することから、三刺激値を物理的に測定することによって数百万色の色表示が可能になる。しかし、表示したい色と同じ色であることだけを表す三刺激値からは、その色が赤に見えているのか、緑に見えているのか、どのような色に知覚されているかを知ることができない。このため、カラーオーダーシステムで表される色知覚に相関する量を表示できるような表色系の必要性から、CIELABに代表される均等色空間が開発されている。CIELABはCIEXYZ表色系の座標変換によって考案されたもので、2色の間にどの程度の色の差があるかを表示することができる。工業製品の色合わせ結果の評価や色彩画像の色再現精度の評価に用いられている。2色の色の間の差を色差といい、三刺激値から色差を予測するシステムを色差式という。

CIE(国際照明委員会)は、1976年にCIELAB($L^*a^*b^*$)及びCIELUV($L^*u^*v^*$)の2つの均等色空間及び色差式を勧告している¹⁾。これらは1980年にJIS(日本工業規格)に採用され、国内に広く普及している。一方では、色差式によって予測される色差値と目視で感じられる色差との間にずれが生じる場合があることが指摘をされており、とり扱う色材によっては上記の国際勧告とは異なった色差式が利用されている。しかし、異なった色差式で計算された数値の間には互換性がないため、色差知覚をより良好に予測できる統一的な色差式の開発が期待されている。

色差評価の問題は、1950年代の終わり頃からCIEの測色委員会(TC-1.3)のワーキングプログラムの一つとして検討された。それに先行して、MacAdam²⁾やWright³⁾の行った色識別実験の結果から、CIE1931色度図で表した色識別楕円の不均等性が指摘され、1940年代に明度の等しい2色の色相とあざやかさに関する知覚差を定量的に表すことのできるUCS色度図の研究が進められた。その結果として、Judd⁴⁾、MacAdam⁵⁾、Judd-Schofield-Hunter⁶⁾らのUCS色度図が開発された。これらのUCS色度図と様々な明度の知覚差を定量的に表すことのできる明度関数とを組み合わせた均等色空間が開発され、色差はそれぞれの均等色空間の距離として定義された。均等色空間の代表的なものとして、Judd⁴⁾、Hunter⁷⁾、Adams-Nikerson⁸⁾、Schofield⁹⁾がある。又、カラーオーダーシステムの一つであるマンセル表色系の均等性を利用したGodlove¹⁰⁾らの色差式も発表されている。これらの研究成果を背景に、CIEは1960年にMacAdam⁵⁾によって提案されたCIE(x, y)色度図の単純な射影変換によって得られるUCS色度図をCIE1960UCS色度図として定め、1964年にWyszek¹¹⁾が提案した立方根を使った明度関数とCIE1960UCS色度図を組み合わせたCIEU*V*W*を均等色空間として勧告した。しかし、この色空間における色差は、Berger¹²⁾らの研究などか

ら目視と一致しない場合があることが明らかになり、1967年に、CIEはGlasserらの立方根を用いた色差式¹³⁾、Godloveのマンセル表色系を用いた色差式¹⁰⁾及びFrielleらのFMC-2色差式¹⁴⁾と色差知覚との比較実験を行うように呼びかけている。更に、1973年に行われたISCC（全米色彩協議会）の調査結果¹⁵⁾で、CIE色差式が公表されてから10年をたっているにもかかわらず、その普及率が僅か7%であることが報告され、色差式と目視とが一致しない例が幾つか報告されるようになってきた。このような背景から、1973年7月のCIE測色委員会では、マンセル表色系の相関量を与えるAdams-Nickerson⁸⁾色差式の採用が検討され、5次式を用いたマンセル明度関数を立方根による明度関数に置き換える提案が承認された。この提案は、その後の審議を経て、CIELABとして採用された。一方、この会議で、光の混色などを扱う色再現工業ではCIEU*V*W*色空間のように2つの色光を混色した結果が2つの色光の色度座標を結んだ直線上で表されるようなUCS色度図を伴うことが色差式の主要な構成要素であるとの意見が出されたため、Eastwood¹⁶⁾らの研究を基にCIEU*V*W*色空間を修正することが提案された。この提案は、その後の審議を経て、CIELUVとして採用された。1975年の会議では、CIELAB及びCIELUVのどちらをCIE色差式として採用するかが討議された。しかし、結論に至らず、1976年に各国の投票によって2つの式をCIE色差式とすることが決まった。しかし、当時すでに、OSA（米国光学会）の研究で、CIE色差式における明度差と色度差の重み付けに関する問題点が指摘されるなど、CIE色差式が技術的に優れたものであるために採用されたとは言いきれない面が残されていた。このため、CIEは1978年に色差研究のためのガイドライン¹⁷⁾を設定し、各研究者が組織的に研究を行い、長期的により良い色差式の開発を目指すことを提案した。わが国においては、日本照明委員会の中に技術委員会が設置¹⁸⁾され、研究が進められた。

色差研究のガイドラインが発表されてから、主としてCIELAB色差式の改良に関する研究が進められ、CIELABで色度座標を記述できるように改良したLABHNU¹⁹⁾色差式、明度差と色度差（色相差及びクロマ差）の重み付けを修正したCMC(l:c)色差式²⁰⁾、BFD(l:c)色差式²¹⁾、REGR色差式²²⁾及びMLAB色差式²³⁾等が提案された。また、CIELAB及びCIELUVにかわる均等色空間の開発も進められた。マンセル表色系を心理物理的に表すために、錐体の相対基本分光感度の非線形変換を用いた均等色空間²⁴⁾及び反対色応答を取り入れた均等色空間NCIII C²⁰⁾が提案されている。

これらの研究成果に基づいて、CIEは色差の明度差、色相差及びクロマ差に重み付けを採用した色差式を1994年及び2000年に勧告した。これらの色差式はCIE94²⁵⁾及びCIEDE2000²⁶⁾と呼ばれ、CIEDE2000については、実地応用の面か

らの試用試験が要請されている。色差知覚の定量化に関する研究は、CIE 表色系が制定されてから 75 年を経過した今日において、色彩科学において解決されていない課題の一つと言える。

以上、色差知覚を定量的に表示するための色差式は、1940 年代以降今日まで継続的に研究が行われ、暫定的に CIE 色差式として勧告されてきた。しかし、産業応用の面からは、より優れた色差式開発に関する期待は大きく、その実現のための研究が継続されている。このような状況下で、色差式の開発研究を進めるにあたっては、次の 2 つの方法が考えられる。

- (1) CIE94 や CIEDE2000 に代表されるように、色差観測実験を行い、その観測データを良好に予測できるように最適化した CIELAB の補正式の開発。
- (2) CIELAB 及び CIELUV に替わる均等色空間を考案、その空間における色差式の開発。

(1)については、色差観測データの普遍性に問題があり、CMC から CIEDE2000 まで、様々な色差式が提案されたが、標準化されるに至っていない。(2)については、色知覚の観測実験が膨大になるため、CIELAB 及び CIELUV と同様に、MacAdam のデータに基づいた均等色度図やカラーオーダシステムを心理物理的な空間で表示することのできる均等色空間の開発が中心になる。しかし、今日まで、国際的に採用することのできる新しい均等色空間が開発されるに至っていない。

本研究では、CIELAB の国際的な普及状況をふまえ、(1)の色差観測データの普遍性という問題を解決するために、マンセル表色系の等歩度性に着目して、CIELAB の補正式を開発することにした。マンセル表色系は、色知覚の三属性である色相、明度及び彩度について、知覚的に等間隔になるように色票を配列したシステムであり、世界的にも広く認知されている。

CIELAB は、異なる 2 色の知覚的色差を数値表示することを目的に CIEXYZ 表色系の座標変換により定められた表色系である。しかし、CIELAB の色空間は知覚的均等性が保障されていないため、知覚的に等間隔になるように色票が配列されているマンセル表色系の色空間を CIELAB で表示(マンセルグリッド)すると、色差の等歩度性にずれが生じ、かつ、ずれの大きさが色空間の座標位置によって異なる。このため、色彩工学分野で解決すべき最大の課題は、色差の等歩度性を保障する色空間の開発であり、色彩関連の産業界では、汎用性の高い色差式の開発が要望されている。

本論文では、初めに CIELAB の不均等性を補正して均等(知覚)色差空間(Uniform perceived color-difference space; 以下、均等色差空間という。)に変

換するための変換式について論じる。ここでいう均等色差空間は、色空間の座標位置に関係なく、マンセル表色系の色票間の色差が等しくなるような色差空間を指す。均等色差空間は、色相、明度及び彩度といった色知覚を表すものでなく、色差の均等性だけを保障する色空間である。マンセル表色系の色票間の色差の等歩度性を保障する色空間であることから、均等色空間と区別するために、均等色差空間という用語を用いている。

次に、導出した変換式を CIELAB に適用して、2 色の間の色差を計算するための新しい色差式、NCDF(New Color-Difference Formula)を提案する。最後に、提案した色差式の算定精度について論じる。

マンセル表色系の彩度差に相関する心理物理的な量を表す方法は、CIELAB とは異なった均等色空間である NCⅢ C²⁵⁾のように、均等色空間の開発として行われている。しかし、本論文のように CIELAB 色空間の均等色差空間への適用変換式によって、マンセル表色系の彩度差に相関する量を導く試みは報告されていない。また、マンセル表色系の色相差に相関する量を心理物理的に表す方法についても、研究例がなく本研究が初めてのものである。

マンセル表色系の等歩度性に基づいた均等色差空間という考え方は、これまでに提案されたことがなく、前述した 2 つの色差式の開発研究の方法が内包する問題点を解決する有効な方法と考えられる。

本論文の構成は、次のとおりである。

第 1 章は序論であり、本研究の背景と目的・目標が述べられている。

第 2 章では、本研究で着目したマンセル表色系の原理について述べている。

第 3 章では、本研究で取り上げた CIE 色差式から予測される色差値と人間によつて知覚される色差との間に生じる問題点について詳述した。また、本研究を進めるに際して、CIELAB を基礎に均等色差空間を開発した根拠及び CIELAB の原理について述べている。

第 4 章では、均等色差空間を開発するために、色知覚空間として広く認知されているマンセル表色系の彩度差を、CIELAB 空間で表した場合のクロマスケールの等歩度性について検討を行った。その結果、色相角によって変化するクロマ差の変化を、余弦関数を用いて近似できることを示し、クロマスケールの変換式である補正関数 $F(C)$ を導出した。補正関数 $F(C)$ を用いて補正したクロマスケールとマンセル表色系の彩度差との一致性を、彩度差に対応するクロマ差の平均値からの偏差によって評価し、良好な相関性が得られることを示した。

また、マンセル表色系の無彩色点が CIELAB 上で偏心することを明らかにし、その原因が色順応効果によることを示した。

第5章では、クロマスケールを修正したCIELAB空間で、隣接するマンセル色相差の等歩度性について検討し、クロマ値で規準化した隣接する色相間の色差が、色相角によって変化することを明らかにした。その色相角による変化を、クロマスケールと同様に、余弦関数で近似した補正関数 $F(H)$ を導出した。また、補正関数 $F(H)$ で補正した隣接する色相差はクロマ値に比例して大きくなることを示し、色差を求める際の補正方法を提案した。

第6章では、クロマスケール及び色相スケールの色相角による変動を補正した均等色差空間を用いた3種類の色差式(New color-difference formula; NCDF、NCDF-1及びNCDF-2)を提案した。NCDF、NCDF-1及びNCDF-2の違いは、マンセル表色系の無彩色点の偏心の補正方法にある。

NCDF、NCDF-1及びNCDF-2には、三属性間の色差知覚が等しくないマンセル表色系の特性を補正するために、明度差、クロマ差及び色相差に相対的な重み付けをするための補正関数 $k(H)$ 及び $k(C)$ を導入した。

また、マンセル表色系における色相差だけが異なる2色の色差を計算する手順を例示した。CIELABでは、色相だけが異なる2色の色差にクロマ差が混入するが、NCDFではその値は無視できるほど十分小さいことを示した。

第7章では、NCDFの産業応用としての有効性を検証するために、これまでに報告されている色差観測データにNCDF、NCDF-1及びNCDF-2を適用し、CIELABを含めた8種類の色差式の性能試験を実施した。この結果、NCDFは観測データを最良に予測できる色差式の一つであり、色差観測データに近似させた実験式であるCIE94と同等の性能を有していることを明らかにした。心理物理的な均等色空間であるCIELABにおけるマンセル表色系の知覚差の均等性に着目して開発されたNCDFが、色差観測データに依存しない色差式として、製品色の色彩管理に有効であることを明らかにした。

第8章は、全体のまとめである。

参考文献

- 1) Publication CIE No.15.2 COLORIMETRY, 2nd (1986)
- 2) D.L.MacAdams : J.Opt.Soc.Amer., 32, 271(1942)
- 3) W.D.Wright : J.Opt.Soc.Amer., 33, 634(1943)
- 4) D.B.Judd : J.Opt.Soc.Amer., 25, 2(1935)
- 5) D.L.MacAdams : J.Opt.Soc.Amer., 27, 294(1937)
- 6) F.Scofield et al : ASTM Bull., 19(1941)
- 7) R.S.Hunter : NBS Circ., C-429(1942)

- 8) D.Nickerson et al : J.Opt.Soc.Amer.,34,550(1944)
- 9) F.Scofield : Natl.Paint,Vernish,Lacquer Assoc.Sci.Sec.Circ.,664(1943)
- 10) I.H.Godlove : J.Opt.Soc.Amer.,41,760(1951)
- 11) G.Wyszecki : J.Opt.Soc.Amer.,53.1318(1963)
- 12) A.Berger et al : Tag.Ber.Intern. Farbtageung Luzern,331(1965)
- 13) L.G.Glasser et al : J.Opt.Soc.Amer.,48,736(1958)
- 14) L.F.C.Friile : J.Opt.Soc.Amer.,55,1314(1965)
- 15) R.Kuehni : ISCC Newsletter,225(1973)
- 16) D.Eastwood : Colour 73,293(1973)
- 17) CIE TC-1.3 COLORIMETRY : Guidelines for Coordinated Research on Colour Difference Evaluation(1978)
- 18) 川上元郎 : 日本照明委員会誌, 6[3,4],20 (1989)
- 19) K.Richter : Color Res. Appl.,5[1],25(1980)
- 20) F.J.J.Clarke et al : J.Soc.Dyers Colourists,100,128(1984)
- 21) M.R.Ruo et al : J.Soc.Dyers Colourists,103,86(1987)
- 22) D.Alman et al : Color Res. Appl.,14[3],139(1989)
- 23) H.Komatsubara : Colour'85(1985)
- 24) T.Seim et al : Color Res. Appl.,11[1],11(1986)
- 25) 池田、小原 : 照学誌,78[2],66(1994)
- 26) Publication CIE No.116 Industrial Colour-difference Evaluation(1995)
- 27) Publication CIE No.142 Improvement to Industrial Colour-difference Evaluation(1995)

第2章 マンセル表色系の概要

2. 1 序論

CIELAB を補正することによって均等色差空間を開発するに際して、マンセル表色系の色知覚の等歩度性に着目して検討を行った。本章では、マンセル表色系の歴史及び原理について述べる。

2. 2 マンセル表色系の歴史

マンセル表色系は、アメリカの A.H.Munsell によって、1905 年に発表された色知覚に基づいたカラーオーダシステム（色知覚空間）である。この表色系は、カラーオーダシステムの特徴である標準色見本（色票）によって構成されている。物体色の色知覚の心理属性である色相（Hue）、明度（Value）及び彩度（Chroma）について、それぞれ等歩度になるように色票が配列されている。色相は、物体色が、赤、黄、緑、青、紫、若しくはそれらの隣り合った 2 つの色の間の色として感じられる色知覚の属性を表す。明度は、白と比較して相対的に判断される物体色の明るさを表す。彩度は、赤や青の度合いが強いか弱いかの、色みの強さの属性を表す。

マンセル表色系による色の表記は、各属性について作られた感覚尺度の記号及び数値を連記して行う。数値を連記したものをマンセル記号といい、色相、明度及び彩度の順に連記した H V/C で表す

A.H.Munsell の考えたシステムを具体化した色票集は、1929 年に Munsell Book of Color として出版され、1943 年にアメリカ光学会（Optical Society of America）で修正が加えられて修正マンセル表色系（Munsell Renotation System）として発表¹⁾された。この修正版は、色票間の等歩度性を、知覚実験及び心理物理的な量である色度座標の両面から検討して作られたもので、1958 年に日本工業規格（JIS）に採用された。現在では、マンセル表色系といえば、この修正版のことをいう。JIS Z 8721（色の表示方法—三属性による表示）²⁾に、マンセル記号に対応した CIEXYZ 表色系の三刺激値（ Y, x, y ）が規定されている。

2. 3 マンセル表色系の原理

マンセル表色系は、色知覚の三つの属性である色相、明度及び彩度を、それぞれ次のように尺度化している。

(a) 色相

色相の知覚差がほぼ等しくなるような 5 つの基本色、赤、黄、緑、青、紫の色

票を作成し、それらの隣り合った間に色相の知覚差がほぼ等歩度になるように分割して尺度化する。5つの色は 5R、5Y、5G、5B、5P で表し、図 2.1 に示す色相環上に配列する。色相環を採用しているのは、赤紫－赤－黄－绿－青－紫－赤紫のように、色相が循環性を持っているためである。

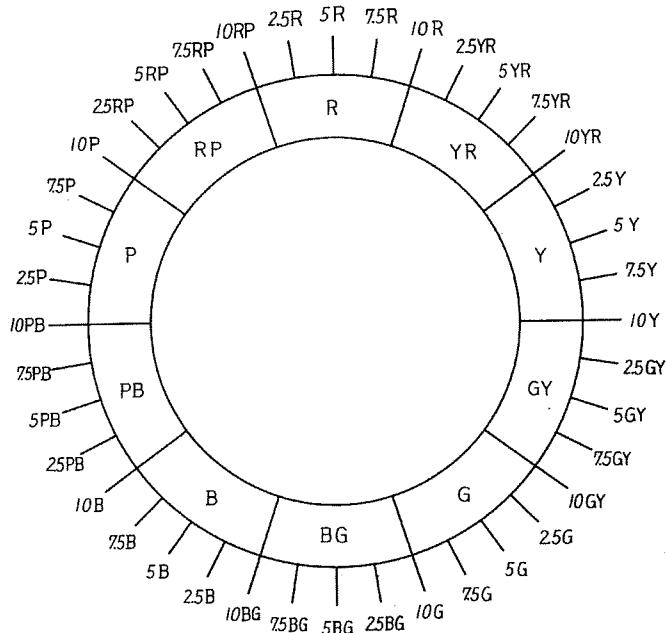


図 2.1 マンセル表色系の色相環

(b) 明度

無彩色を基準として、図 2.2 に示すように、理想的な黒を 0、理想的な白を 10 とし、その間を明度の知覚差がほぼ等歩度になるように分割して尺度化する。明度の表記は、図 2.2 に示す数字で行う。

(c) 彩度

色相及び明度が一定な色の配列を、図 2.2 に示すように、彩度の知覚差がほぼ等歩度になるように分割して尺度化し、無彩色を 0 として、彩度の度合いが増加するに従って、1、2、3、4……のように数字で表す。

(d) マンセル表色系による色の表示

マンセル表色系による色の表示は、色相、明度及び彩度を連記し、5R 4/12 のようにする。ただし、無彩色の場合は、N9 のように記号 N と明度の数字で表示する。

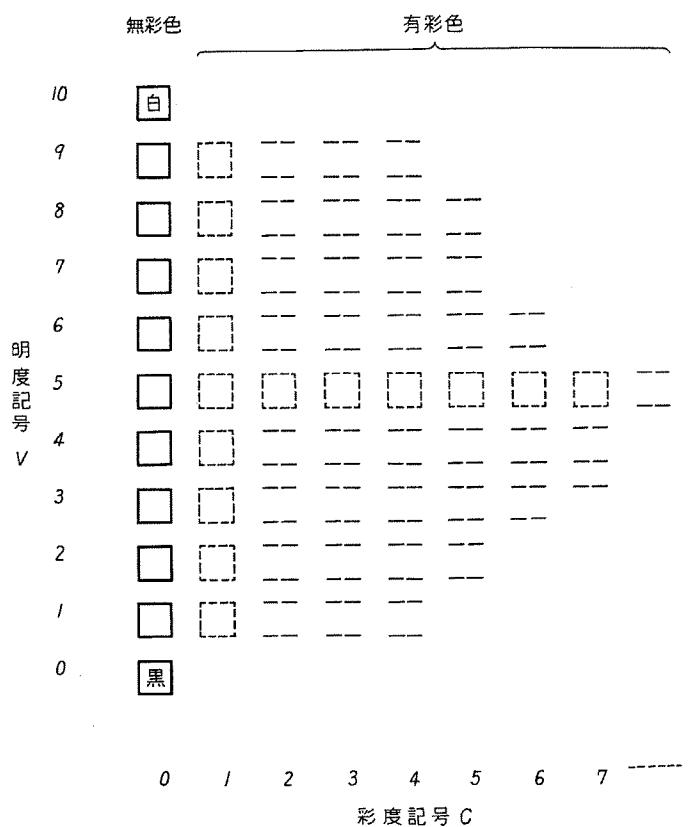


図 2.2 マンセル表色系の等色相面における明度と彩度の配列

(c) マンセル表色系の基準値

図 2.1 及び図 2.2 のように色知覚の各属性について、ほぼ等歩度に知覚される色票の、CIEXYZ 表色系の三刺激値 (Y, x, y) が、JIS Z 8721 (色の表示方法—三属性による表示) で規定されている。しかし、尺度単位として用いられることが多い色相 2.5、明度 1.0 及び彩度 2.0 間隔の知覚差を比較した場合、等しい知覚差には感じられないことが知られている。従って、属性間の等歩度性は考慮されていないシステムである。

2. 4 結論

均等色差空間を検討するための基礎となるマンセル表色系の概要について述べた。均等色差空間は、マンセル表色系の属性ごとに、隣接する色票間の色差が等しくなるように補正変換式で色差を補正した空間である。補正変換式を検討するために、JIS Z 8721 に規定されているマンセル記号に対応した CIEXYZ 表色系³⁾の三刺激値 (Y, x, y) から計算した色差を基礎データとして用いる。

参考文献

- 1) S.Newhall et al : J.Opt.Soc.Amer.,33,385(1943)
- 2) JIS Z 8721 色の表示方法－三属性による表示(1993)
- 3) JIS Z 8701 色の表示方法－ XYZ 及び $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ による表示(1999)

第3章 均等色差空間の必要性の背景

3.1 序論

第2章では均等色差空間の基本となるマンセル表色系の原理について述べたが、本章では、CIELAB色空間の適用変換式でマンセル表色系の属性ごとの色差を補正した均等色差空間の必要性と背景について詳述する。

最初に、CIELABが国際的なデファクトスタンダードとして利用されている状況及び利用における問題点について述べる。次に、CIELABが採択されるまでの経緯とCIELAB及び色差式の特徴を整理し、均等色差空間の考え方について述べる。更に、均等色差空間の基本となるCIELABの原理について述べる。

なお、本研究では、色差の見え方を表す場合には色差知覚（*appearance of color-difference*）という用語を用い、色差知覚を尺度化した数値で表す場合には知覚色差（*perceived color-difference*）という用語を用いている。

3.2 CIE色差式の利用状況と色差知覚

色差研究のガイドライン¹⁾の発表により、1978年以降、各国の研究者による色差知覚に関する実地試験が進められ、CIELABを修正したCIE94²⁾及びCIEDE2000³⁾がまとめられている。しかし、CIE94及びCIEDE2000は、ともに限定された観測データを用いた実験式的意味合いが強く、色差式の構造の複雑性とそれによって得られる実効性についての疑問が指摘されている。CIEではCIEDE2000の実地試験を呼びかけている状況にあり、統一的な色差式の採用までには至っていない。

日本照明委員会では、CIEの色差研究のガイドラインに基づいて、どのような研究協力ができるかを検討するために国内技術委員会を設置して検討を行った。その中で、我が国においてCIE色差式がどのように利用され、知覚色差との関係においてどのような問題を抱えているかのアンケート調査を実施し、その結果⁴⁾を報告している。調査結果から、実地応用に用いられている色差式の種類は、表3.1のように「CIELAB」56.4%、「HUNTER-LAB」21.8%、「CIELUV」8.2%、「アダムスニッカーソン」4.5%及び「その他」6.4%となっている。CIE色差式が1976年に勧告されてから、12年を経過した時点でのCIELABの普及の状況を表している。一方、アンケートが回収できた産業分野の解析から、CIELABを利用している技術者は、主として表面色を扱う人々が中心になっている。これに対して利用比率は少ないものの、照明や光学レンズなどを扱う分野では、CIELUVが利用されている結果が得られている。

CIE の勧告では、利用分野による 2 つの色差式の適用区別を一切していないにとかかわらず、実際には CIELAB は表面色の評価に、CIELUV は発光色や透過色の評価というように利用分野の区別化がなされている結果になっている。このアンケート調査以降、我が国での同様な調査は行われていないが、欧米での調査⁵⁾などから CIELAB の普及が進んでいるのに対して、CIELUV を利用している割合が少ないことが明らかにされている。このように、CIELAB が実質的なデファクトスタンダードとして認知されている状況にある。

また、本研究が必要とされている背景になっている色差式によって予測される色差と目視で感じられる知覚色差との間に生じるズレの理由として、アンケート結果では表 3.2 の「色の種類によって色差値の大きさが変化する」36.8%、「明度差と色度差との相対的な大きさ」23.7% 及び「その他」5.3% の理由があげられている。同時に実施されたアンケート項目の回答結果から総合すると、「低明度高彩度の赤あるいは紫」の色領域で知覚色差との間にズレが生じることが多い結果になっている。測定の精度、知覚色差の評価基準（色差が識別できるかどうかの判定又は知覚される色差が許容できるかどうかの判定など、判定の基準）による影響も無視できないが、この結果は、色差式の色差知覚に対する不一致性が生じる要因を示している。特に、CIE94 及び CIEDE2000 で採用されている明度差と色度差（色相差と彩度差を総合した差）の重み付けが、CIELAB では適正でないことが指摘されている点が注目される。

このように、CIE 色差式、特に CIELAB は広く普及しており、デファクトスタンダードとして利用されている。しかし、一方では、色差知覚との間にズレが生じる場合があり、その解決が要望されている。

表 3.1 色差式の利用状況

色差式	CIELAB	CIELUV	ANLAB	HUNTER	FMC	その他	回答なし
回答度数	62	9	5	24	2	5	3
回答比率	56.4	8.2	4.5	21.8	1.8	4.5	2.7

表 3.2 色差値と知覚色差に生じる差違の要因

知覚色差と色差値が相関しない要因	回答度数	回答比率
色の種類によって色差の大きさが変化する	28	36.8
明度差と色度差との相対的な大きさ	18	23.7
その他	4	5.3
回答なし	26	34.2

3. 3 CIE 色差式の歴史と CIELAB 色差式の改良

1964 年に勧告された CIE 色差式から、2000 年までに CIE で採用された色差式の流れをまとめると図 3.1 のようなフローになる。

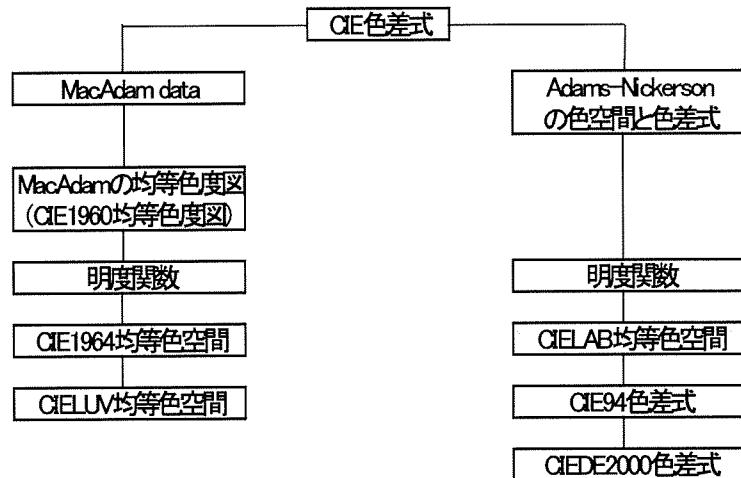


図 3.1 CIE 色差式の開発の流れ

図 3.1 の左のフローは、MacAdam⁶⁾や Wright⁷⁾が行った色識別実験結果に基づくものである。CIE $x\text{-}y$ 色度図上における色識別精度円は色座標の位置によって大きさが異なっているため、色度図上で同じ大きさの円で表すことのできる均等色度図の開発を目指したものである。1976 年に CIELUV として採用されて、今日に至っている。図 3.1 の右のフローは、色知覚空間として知られているマンセル表色系を、心理物理的な量である三刺激値を使って表示することを目的とした均等色空間の開発を目指したものである。1976 年に CIELAB として採用され、その後 CIEDE2000 に至っている。CIELUV は、色識別実験の結果を基にしていることから、色差の閾値又は閾値よりやや大きいが比較的小さい色差を表示することを目的にしたものである。これに対して、CIELAB はマンセル表色系の色相、明度及び彩度の相関量を与えるもので、閾値の十数倍に相当する比較的大きな色差の表示を目的にしている。図 3.2 及び図 3.3 に CIELAB 及び CIELUV の上にマンセル表色系の基準値を付置したグリッド図を示す。図 3.2 及び図 3.3 で放射線状にのびている線は色相の等しい色の軌跡（等色相線という。）を表し、同心円状の線は彩度が等しい色の軌跡（等彩度線という。）を表している。等色相線が直線

で表され、その間隔が等しく、等彩度線が円になるような均等色空間が理想とされる。この観点から図 3.2 及び図 3.3 を比較すると、CIELAB が CIELUV よりマンセル表色系の表示に適していることがわかる。また、塗装製品や繊維製品のような表面色を用いた閾値近傍の比較的小さい色差観測データと色差の一一致性を比較した結果⁸⁾でも、CIE 色差式の開発の経緯から期待される結果とは異なり、CIELAB による色差と色差観測データとの一致性が優れていることが報告されている。

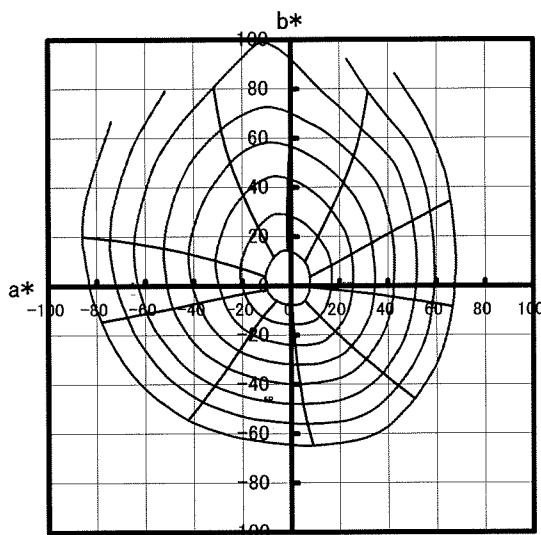


図 3.2 CIELAB のマンセルグリッド

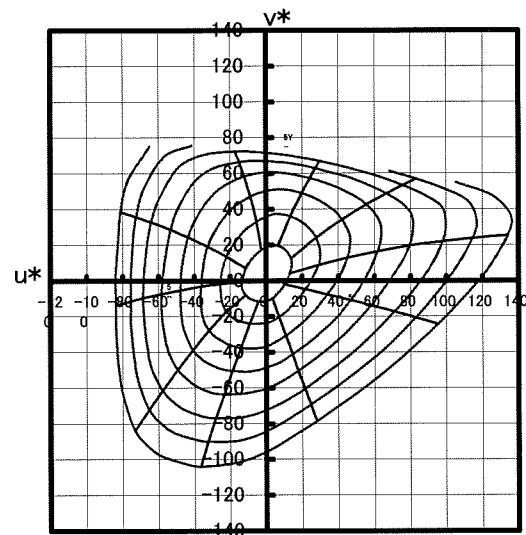


図 3.3 CIELUV のマンセルグリッド

このような状況から、塗料、染料、インキなどを用いて色再現を行っている産業分野では CIELAB がデファクトスタンダードとして利用されている。しかし、表 3.2 に見られるように CIELAB と色差知覚との不一致が生じることから、CIE では CIE TC 1-29 (Industrial Colour-Difference Evaluation)及び CIE TC 1-47 (Improvement to Industrial Colour-difference Evaluation)を設置して CIELAB の改良を行い、CIE94 及び CIEDE2000 を提案している。現在、CIEDE2000 の実地試験が実施されているが、色差知覚との不一致が解決されていないことが報告⁹⁾されている。

色差知覚をより正確に予測できる色差式を開発する方法には、図 3.1 に示したように新しい均等色度図を開発する方法、及び既存の色知覚空間を三刺激値の座

標変換によって近似的に表示する均等色空間を開発する方法がある。しかし、1940年代以降の色差式に関する研究からまとめられた CIELAB 及び CIELUV は、色差式開発の 2つのアプローチから得られた最も優れた代表的な色差式と考えられる。CIELAB 及び CIELUV とは異なった、まったく新しい均等色空間の開発は非常に困難と考えられる。

このため本研究では、図 3.2 のマンセルグリッドの歪みに着目し、知覚差の等間隔性を指標として修正した新しい概念である均等色差空間を提案する。更に、マンセル表色系の三属性間における知覚差の不一致を、CIELAB の色相差、明度差及びクロマ差の各色差属性に重み付けを行って色差を求める方法を組合せることによって、デファクトスタンダードとして利用されている CIELAB 色差式の修正を検討することにした。

3. 4 XYZ 表色系及び CIELAB の原理

(a) XYZ 表色系の原理

CIELAB の基本となる XYZ 表色系における三刺激値の計算原理について以下に示す。XYZ 表色系における三刺激値は式 (3-1) によって計算する。

$$\begin{aligned} X &= K \Sigma S(\lambda) R(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta \lambda \\ Y &= K \Sigma S(\lambda) R(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta \lambda \\ Z &= K \Sigma S(\lambda) R(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta \lambda \end{aligned} \quad (3-1)$$

ここで、 $S(\lambda)$ ：色の表示に用いる標準イルミナントの分光分布

$R(\lambda)$ ：試料の分光反射率

$\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ ：XYZ 表色系における等色関数

Σ ：波長範囲は原則として 380nm~780nm

$\Delta \lambda$ ：波長間隔は原則として 5nm

K ：標準イルミナントで照明した完全拡散反射面の三刺激値

Y の値を 100 するための係数

マンセル表色系では、色の表示に用いる標準イルミナントは、補助標準イルミナント C を用いる。補助標準イルミナント C の相対分光分布を図 3.4 に示す。

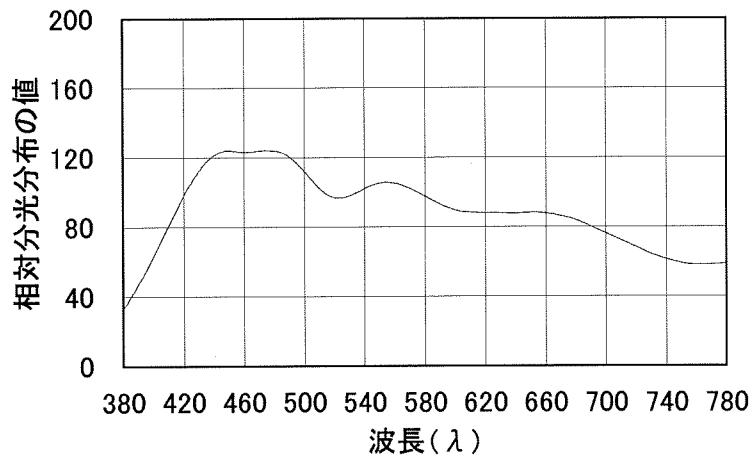


図 3.4 補助標準イルミナント C の相対分光分布

等色関数は、CIE が 1931 年にとりまとめた等色実験の結果であり、各波長の光と同じ色を作り出すために必要な色光 XYZ の混色量（三刺激値）を表す。等色関数は、眼の網膜にある 3 種類の錐体の分光感度を間接的に表している。マンセル表色系の色票の三刺激値を計算するときに用いる等色関数（CIE 1931 測色標準観測者）を図 3.5 に示す。

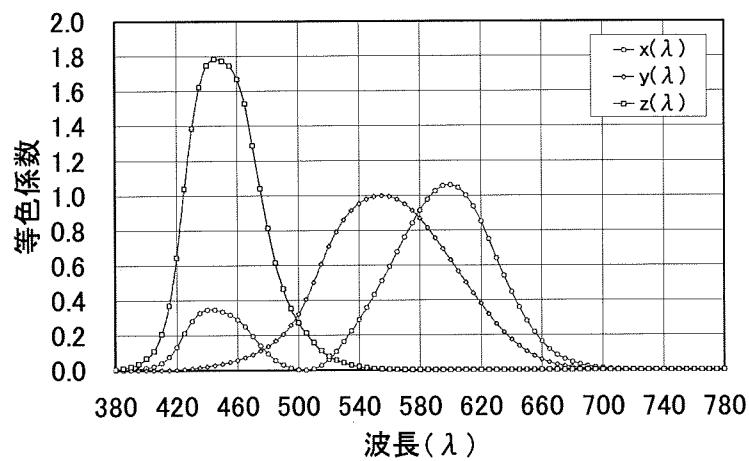


図 3.5 測色標準観測者の等色関数

試料の分光反射率は、分光測光器を用いた測定によって求める。式 (3-1) の $S(\lambda)R(\lambda)$ は試料からの眼に入る反射光に相当する。三刺激値は、眼に入ってくる光を、3 種類の錐体の分光感度に相当する等色関数で評価した値を示している。

また、等色実験に基づいた等色関数から得られる三刺激値は、試料と等色するときの色光 X、Y、Z の混色量を表している。XYZ 表色系における色は、三次元座標として表すことができるが、いつも三次元座標で表示するのは不便であるため、式 (3-2) で定める色度座標を用いることが多い。

$$\begin{aligned} x &= X/(X + Y + Z) \\ y &= Y/(X + Y + Z) \end{aligned} \quad (3-2)$$

XYZ 表色系は、色度座標と明るさを表す三刺激値の Y の組み合わせで色を表すことができることから三色表色系と呼ばれる。

(b) CIELAB の原理

CIELAB は、図 3.1 の右のフローに示したように Adams が 1942 年に提案した chromatic value 色度図¹⁰⁾を基に、Nickerson がマンセルバリューフィルターを組み合わせて作られた均等色空間に基づいている。マンセルバリューフィルターは、式 (3-3) であらわされる代表的な明度フィルターである。ただし、明度 Vy から三刺激値の Y を求めるには不便であるため Cube-root を用いた式 (3-4) の明度フィルターが提案されている。CIELAB は、式(3-3)の代わりに式 (3-4) を用いて Adams-Nickerson の均等色空間の計算の手続きを簡略化したものである。

$$100Y/Y_{MgO} = 1.2219V - 0.23111V^2 + 0.23951V^3 - 0.021009V^4 + 0.00008404V^5 \quad (3-3)$$

ここに、Y: CIEXYZ 表色系の標準の光による三刺激値 Y の値

Y_{MgO} : CIEXYZ 表色系の酸化マグネシウムの標準の光による三刺激値 Y の値

V: マンセル表色系の明度

$$Vy = 11.6(Y/Y_n)^{1/3} - 1.6 \quad (3-4)$$

ここに、Y: CIEXYZ 表色系の標準の光による三刺激値 Y の値

Y_n : CIEXYZ 表色系の完全拡散反射体の標準の光による三刺激値 Y の値

式 (3-4) を用いて Adams-Nickerson の均等色空間の座標は式 (3-5) で表すことができる。

$$\begin{aligned} L &= 9.2 Vy \\ a &= 40 (V_x - Vy) \end{aligned} \quad (3-5)$$

$$b = 16 (V_z - V_y)$$

ここに、 V_x 、 V_z ：CIEXYZ 表色系の三刺激値 X 及び Z の値から式 (3・3) を用いて計算される値

V_x 、 V_y 、 V_z の計算を式 (3・4) に置き換えると、式 (3・5) は式 (3・6) で表される。

$$\begin{aligned} L &= 106.72 (Y/Y_n)^{1/3} - 14.72 \\ a &= 464.0 \{(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}\} \\ b &= 185.6 \{(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}\} \end{aligned} \quad (3\cdot6)$$

式 (3・6) で完全拡散反射体の三刺激値の Y 値を計算すると $L=92.0$ になる。これを $L=100$ になるように式 (3・6) を調整すると式 (3・7) のようになる。

$$\begin{aligned} L &= 116 (Y/Y_n)^{1/3} - 16 \\ a &= 504.3 \{(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}\} \\ b &= 201.7 \{(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}\} \end{aligned} \quad (3\cdot7)$$

式 (3・7) の a 及び b の係数を、それぞれ $504.3 \rightarrow 500$ 、 $201.7 \rightarrow 200$ のように端数を丸めた式 (3・8) が CIELAB として採用されている。

$$\begin{aligned} L^* &= 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16 \\ a^* &= 500 \{(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}\} \\ b^* &= 200 \{(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}\} \end{aligned} \quad (3\cdot8)$$

ここに、 X 、 Y 、 Z : CIEXYZ 表色系の三刺激値
 X_n 、 Y_n 、 Z_n : CIEXYZ 表色系の完全拡散反射体の標準の光による三刺激値

また、CIELAB を用いた 2 色の色差は、式 (3・9) により計算する。

$$\Delta E^* = \{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2\}^{1/2} \quad (3\cdot9)$$

ここに、 ΔL^* : 2 色の式 (3・8) に示す明度指数 L^* の差

Δa^* : 2 色の式 (3・8) に示す色座標 a^* の差

Δb^* : 2 色の式 (3・8) に示す色座標 b^* の差

CIELAB の原理から、CIELAB はマンセル表色系に基づいた均等色空間と考えられる。しかし、図 3.2 に示したように、等色相線及び等彩度線ともに歪みが見られることから、マンセル表色系を正確に表していない。本研究の目的は、等色相線が角度差の等しい放射線で表されて、等彩度線が間隔の等しい同心円で表されるような新しい均等色空間を開発するものではない。マンセル表色系の等歩度性に着目して、隣接する等色相線及び等彩度線の間の色差が等しくなる均等色差空間を開発することにある。

3. 5 結論

CIELAB は、デファクトスタンダードとして国際的に用いられている。また、CIELAB は、その原理から、心理物理的な量である三刺激値 XYZ の変換によってマンセル表色系を表すことを目的として作られた均等色空間である。しかし、CIELAB のマンセル表色系のグリッド図には歪みが見られる。CIELAB 色差式から計算される色差と色差知覚との不一致性は、この歪みに起因していることが推定される。本研究ではこの点に着目し、マンセル表色系の等歩度性を基本とし、CIELAB 色空間を用いた均等色差空間の開発について検討する。

参考文献

- 1) CIE TC-1.3 COLORIMETRY : Guidelines for Coordinated Research on Colour Difference Evaluation(1978)
- 2) Publication CIE No.116 Industrial Colour-difference Evaluation(1995)
- 3) Publication CIE No.142 Improvement to Industrial Colour-difference Evaluation(1995)
- 4) 小松原 仁 : 色彩研究,35[2],6(1988)
- 5) R.G.Kuehni : Color Res.Appl.,15[5],261(1990)
- 6) D.L.MacAdams : J.Opt.Soc.Amer.,32,271(1942)
- 7) W.D.Wright : J.Opt.Soc.Amer.,33,634(1943)
- 8) 小松原 : 照学誌,[5],293(2003)
- 9) 細川ほか : 照学全大,268(2005)
- 10) D.Nickerson et al : J.Opt.Soc.Amer.,34,550(1944)

第4章 CIELAB クロマスケールの補正関数

4. 1 序論

マンセル表色系の彩度スケールは知覚的な彩度差が等間隔になるように設定されている。この等間隔性が確かに成立すると仮定すると、均等色空間で表されるグリッドは等間隔な同心円によって表される。しかし、図3.2のマンセルグリッドは、主として b^* 軸方向に、明らかな等間隔性の歪みが見られる。均等色差空間を開発するにあたり、最初に、この等間隔性の歪みについて、隣接する彩度間の色差の等間隔性の観点からクロマスケールの検討を行った。

なお、本研究では、CIELABで定義されている彩度の相関量であるメトリッククロマ¹⁾とマンセル表色系の彩度とを区別するために前者に「クロマ」、後者に「彩度」の用語を用いる。

4. 2 CIELABにおけるマンセル表色系の隣接彩度間の色差

マンセル表色系の色票の三刺激値は、JIS Z 8721（色の表示方法－三属性による表示）に規定されている。JIS Z 8721の40色相の表色系の基準から、明度 $V=9$ 、7、5、3、1で、彩度 $C=1, 2, 3, 4, 6, \dots, 20$ の基準値を用いて、同一色相及び同一明度の隣接する彩度の色票間の色差を計算した。明度 $V=5$ の計算結果を表4.1.1～表4.1.2に示す。表中で網掛けをして示した色差は、40色相の基準が全て規定されていなくて、近接する色相環が欠落するために他の色差と比較して著しく大きな色差になっているものである。欠落部分の近接領域では、色材の色域の制約によって色票を作ることができないため、近接領域の色票を用いて補外法によって基準が決められている。このため、知覚的な等間隔性がくずれていることが推定される。表4.1.1～表4.1.2の網かけ部分の結果の不規則性は、CIELABの不等間隔性だけでなく、マンセル表色系の基準の不等間隔性にも起因していることが推定される。このため、以後の解析ではデータから除外した。JIS Z 8721に規定されている彩度 $C=20$ 以上の基準値についても同様の理由から除外した。

明度 $V=9, 7, 3, 1$ についても $V=5$ と同様の計算を行い、隣接する彩度間の平均色差を計算した結果を表4.2.1～表4.2.2に示す。表中の ΔC^* はCIELABの彩度に相関する量であるクロマの差を平均した平均色差を、H.angleはCIELABの色相に相関する量である色相角[deg]¹⁾を各基準値について計算し、彩度 $C=1$ ～20までの色相角を色相ごとに平均した平均色相角を示す。表4.2の明度 $V=1$ の色相 $H=2.5R$ ～10YRの平均色相角は、他の明度に比較して、明らかに（-）方向への偏移が見られる。マンセル表色系の尺度を構成する際の観察条件による色

相知覚の偏移などが理由としてあげられる。この偏移がマンセル表色系の実験的な要因による色相知覚の偏移によるものなのか、CIELAB の不均等性によるものかは、なかならずしも明確でない。このため、クロマスケールの解析には、データの信頼性を考慮して明度 $V=9 \sim 3$ までのデータを用いて解析を進めることにする。表 4.2 の「 $V=9 \sim 3$ 」の行の値は、明度 $V=9 \sim 3$ までのクロマ差 (ΔC^*) の平均値 (C.average) 及び色相角の平均値 (H.angle) を示す。このクロマ差 (ΔC^*) の平均値 (C.average) を 40 色相について平均した総平均値を計算すると約 10 になる。便宜的に、明度差 $\Delta V=1$ の平均色差 ($\Delta L^*=10$) とスケールを合わせるために、総平均値が 10 になるように正規化した結果が表 4.2 の正規化の行の値である。この行の値の変化は、マンセル表色系の彩度差 $\Delta C=2$ が $\Delta C^*=10$ に対応するよう仮定したクロマ差 (平均値 (C.average)) の、色相角による変動を示している。クロマ差の平均値 (C.average) は、色相角によって系統的に変動しており、変動の幅は、 $\Delta C^*=7.19 \sim 14.14$ になっている。

表 4.2 の補正係数は、各色相のクロマ差の平均値を 10 にするための係数である。補正係数の色相角の平均値 (H.angle) に対する変化の様子を図 4.1 に示す。

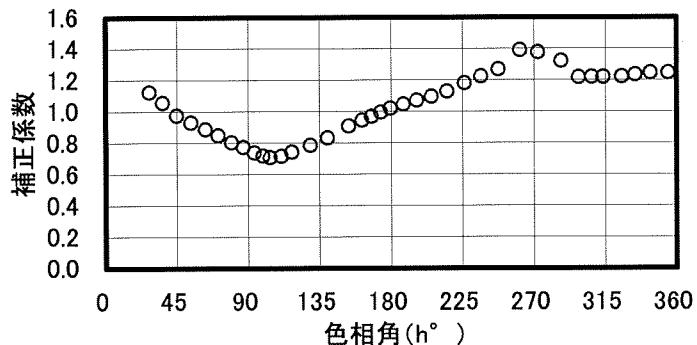


図 4.1 クロマ差の平均値の色相角に対する変化

この結果は、マンセル表色系を等知覚空間と仮定した場合、CIELAB の彩度差に相關する量である ΔC^* の均等性に問題があることを表しており、色相角に依存しない等間隔性を持つクロマスケールの必要性を示している。

表 4.1.1 マンセル表色系の等色相面及び等明度面（明度 5）における隣接色票の色差

明度／彩度	2.5R	5R	7.5R	10R	2.5YR	5YR	7.5YR	10YR	2.5Y	5Y	7.5Y	10Y	2.5GY	5GY	7.5GY	10GY	2.5G	5G	7.5G	10G	
5.0-1	3.97	4.02	4.28	4.71	5.33	5.72	5.93	6.45	6.85	7.20	7.26	7.18	7.07	6.90	6.51	6.18	5.92	5.59	5.43	5.19	
5.1-2	4.41	4.67	4.84	5.07	5.32	5.64	5.98	6.42	6.81	7.17	7.35	7.42	7.13	6.78	6.33	6.02	5.72	5.54	5.38	5.23	
5.2-3	4.65	4.95	5.14	5.30	5.34	5.68	6.07	6.47	6.84	7.21	7.45	7.56	7.23	6.81	6.31	5.97	5.63	5.55	5.38	5.22	
5.3-4	4.78	5.05	5.24	5.46	5.45	5.80	6.19	6.56	6.94	7.30	7.53	7.64	7.29	6.89	6.38	5.96	5.58	5.44	5.28	5.19	
5.4-6	9.28	9.52	9.95	10.87	11.46	12.23	12.91	13.61	14.36	14.78	15.29	15.17	14.97	14.38	13.34	12.22	11.24	10.64	10.24	9.77	
5.6-8	9.05	9.45	10.22	10.99	11.81	12.16	12.52	12.73	12.88	13.17	13.67	14.16	14.65	14.22	13.03	12.54	11.71	11.36	11.16	11.08	
5.8-10	8.93	9.54	10.02	11.23	11.59	11.48	11.86	12.52	12.55	13.45	14.13	14.25	13.91	13.90	13.89	12.49	11.04	10.54	10.25	10.05	
5.10-12	9.35	9.56	10.16	11.41	11.18	11.55	13.22	14.34	17.97	21.84	24.62	26.13	21.17	16.96	13.77	13.18	12.16	12.11	12.21	12.22	
5.12-14	7.59	8.21	9.40	10.33	11.89	14.92	20.28									14.99	11.79	10.98	10.10	9.78	9.30
5.14-16	8.84	9.46	10.21	11.71	16.85											13.29	11.62	11.30	10.79	10.76	
5.16-18	8.77	9.41	9.42	9.11												14.79	11.77	10.96	10.98	10.90	
5.18-20	9.31	8.07	9.14														10.66	9.40	9.22	9.22	
C.average	8.89	9.22	9.79	10.76	11.20	11.64	12.36	13.13	13.53	14.16	14.61	14.74	14.42	13.89	13.34	12.60	11.41	10.89	10.63	10.41	
H.angle	18.42	27.11	35.62	46.11	54.60	62.48	70.09	77.89	85.38	92.77	97.98	103.45	110.57	117.88	129.16	139.75	154.68	163.58	169.10	174.80	

表 4.1.2 マンセル表色系の等色相面及び等明度面（明度 5）における隣接色票の色差

明度/彩度	2.5BG	5BG	7.5BG	10BG	2.5B	5B	7.5B	10B	2.5PB	5PB	7.5PB	10PB	2.5P	5P	7.5P	10P	2.5RP	5RP	7.5RP	10RP			
5.0-1	5.09	4.98	4.96	4.72	4.45	4.16	3.98	3.87	3.84	3.82	3.80	4.02	4.10	4.04	4.02	3.85	3.83	3.84	3.77	3.80	3.87		
5.1-2	5.08	4.89	4.73	4.56	4.43	4.29	4.13	3.99	3.87	3.90	4.00	4.15	4.28	4.22	4.16	4.06	4.04	4.03	4.17	4.23	4.29		
5.2-3	5.04	4.79	4.58	4.46	4.42	4.33	4.19	4.07	3.91	3.93	3.98	4.20	4.37	4.34	4.36	4.22	4.21	4.30	4.39	4.50	4.50		
5.3-4	4.96	4.78	4.51	4.40	4.43	4.34	4.22	4.08	3.97	4.01	4.10	4.29	4.47	4.43	4.49	4.42	4.42	4.42	4.52	4.63	4.63		
5.4-6	9.41	9.03	9.24	9.10	8.82	8.49	8.14	7.98	8.29	8.42	8.94	9.33	8.84	8.91	8.92	9.07	9.01	8.87	9.01	9.03	9.03		
5.6-8	10.90	10.42	9.79	9.33	8.87	8.47	8.11	8.07	7.92	7.95	8.36	8.32	9.03	8.87	9.01	9.05	9.28	9.10	8.99	9.02	9.02		
5.8-10	10.30	10.60	10.24	9.77	9.26	8.27	7.94	7.96	7.99	8.05	7.87	8.35	8.06	8.09	7.84	7.91	7.67	7.86	7.84	8.27	8.27		
5.10-12	11.57	10.89	10.51	9.83	9.69	9.00	8.48	8.15	8.00	8.10	9.04	8.79	8.81	8.98	8.77	8.76	8.71	8.74	9.21	9.21	9.29		
5.12-14	8.74	8.16	8.34	8.34	8.15	8.24	8.10	8.02	7.80	8.20	8.98	9.03	8.37	8.01	8.32	8.13	8.29	7.84	7.39	7.39	7.32		
5.14-16	11.11	10.81	10.50	10.57	9.97	9.47	8.82	8.58	8.69	9.05	9.00	9.11	8.63	8.71	8.33	8.24	7.87	8.20	8.35	8.79	8.79		
5.16-18	10.45	11.67	11.10										9.49	10.08	8.02	8.18	8.44	8.90	8.48	8.12	7.88	8.14	
5.18-20	9.93	9.28											7.14	8.57	9.98	9.19	9.13	8.52	8.46	8.71	8.23	8.35	8.61
C coverage	10.23	9.98	9.75	9.32	9.02	8.62	8.26	7.99	8.04	8.24	8.71	8.63	8.61	8.54	8.52	8.45	8.33	8.32	8.41	8.62			
H angle	181.08	189.90	197.84	207.74	217.17	229.06	240.03	251.33	263.98	275.34	290.05	300.36	308.71	315.95	325.08	333.25	342.41	354.11	362.61	362.61	11.05		

表 4.2.1 マンセル表色系の等色相面における隣接色票の平均クロマ差と平均色相角

明度		色相																			
		2.5R	5R	7.5R	10R	2.5YR	5YR	7.5YR	10YR	2.5Y	5Y	7.5Y	10Y	2.5GY	5GY	7.5GY	10GY	2.5G	5G	7.5G	10G
9	ΔC^*	8.80	9.25	9.92	10.62	11.32	12.02	12.70	13.54	13.94	14.71	15.11	15.34	15.49	15.29	14.44	13.54	12.70	12.15	11.83	11.41
	Handle	22.54	31.29	39.24	46.66	56.19	66.78	74.96	83.68	90.05	97.01	101.43	103.67	110.33	115.89	127.59	138.24	150.05	158.13	165.02	170.70
7	ΔC^*	8.76	9.05	9.73	10.60	11.23	11.80	12.41	13.08	13.78	14.38	14.88	15.32	15.24	14.50	13.45	12.50	11.57	11.08	10.80	10.47
	Handle	21.34	28.29	36.96	46.30	55.35	64.57	72.17	80.34	87.54	94.09	98.96	103.36	109.31	115.88	127.90	139.12	151.68	161.06	166.72	172.45
5	ΔC^*	8.89	9.22	9.79	10.76	11.20	11.64	12.36	13.13	13.53	14.16	14.61	14.74	14.42	13.89	13.34	12.60	11.41	10.89	10.63	10.41
	Handle	18.42	27.11	35.62	46.11	54.60	62.48	70.09	77.89	85.38	92.77	97.98	103.45	110.57	117.88	129.16	139.75	154.68	163.58	169.10	174.80
3	ΔC^*	9.57	9.86	10.34	11.11	11.35	11.82	12.03	12.55	13.13	13.57	13.94	14.01	13.56	12.81	12.19	11.80	10.60	10.31	10.07	9.93
	Handle	15.24	23.52	31.74	40.25	49.06	57.43	66.04	75.17	83.62	91.27	98.00	104.96	113.13	119.92	132.01	142.61	156.90	164.86	170.62	176.55
$V=9 \sim 1$	ΔC^*	9.43	9.41	9.54	9.95	11.45	14.30	13.83	11.14	10.44	9.58	8.88	8.14	7.36	16.66	12.60	12.29	12.04	11.83	11.59	11.26
	Handle	-3.44	4.62	12.15	21.02	35.50	50.03	58.18	68.46	80.03	88.72	96.58	105.48	114.91	122.40	137.04	148.63	159.66	165.89	172.20	178.19
$V=9 \sim 3$	C.average	9.09	9.36	9.86	10.61	11.31	12.32	12.67	12.69	12.96	13.28	13.49	13.51	13.21	14.63	13.21	12.55	11.66	11.25	10.98	10.70
	Handle	14.82	22.97	31.14	40.07	50.14	60.26	68.29	77.11	85.32	92.77	98.59	104.19	111.65	118.39	130.74	141.67	154.59	162.70	168.73	174.54
$V=9 \sim 3$	C.average	9.01	9.35	9.94	10.77	11.27	11.82	12.37	13.07	13.59	14.21	14.64	14.85	14.68	14.12	13.36	12.61	11.57	11.11	10.83	10.56
	Handle	19.38	27.55	35.89	44.83	53.80	62.82	70.81	79.27	86.65	93.78	99.09	103.86	110.83	117.39	129.17	139.93	153.33	161.91	167.87	173.62
正規化	$V=9 \sim 3$	8.57	8.90	9.46	10.25	10.73	11.25	11.78	12.44	12.94	13.52	13.93	14.13	13.97	13.44	12.71	12.00	11.01	10.57	10.31	10.05
	補正系数	1.167	1.124	1.057	0.975	0.932	0.889	0.849	0.804	0.773	0.740	0.718	0.707	0.716	0.744	0.787	0.833	0.908	0.946	0.970	0.995

表 4.2.2 マンセル表色系の等色相面における隣接色票の平均クロマ差と平均色相角

明度		色相																			
		2.5BG	5BG	7.5BG	10BG	5B	7.5B	10B	2.5PB	5PB	7.5PB	10PB	2.5P	5P	7.5P	10P	2.5RP	5RP	7.5RP	10RP	
9	ΔC^*	11.23	10.91	10.60	10.49	10.05	9.54	9.01	8.51	5.76	5.53	5.45	7.92	7.75	7.93	7.98	7.84	7.79	7.89	8.09	8.39
	H.angle	175.70	182.38	191.53	198.86	208.89	218.86	229.09	238.15	255.21	265.79	280.59	294.03	301.51	308.49	326.77	336.78	347.08	359.01	367.54	375.46
7	ΔC^*	10.08	9.79	9.55	9.36	9.11	8.64	8.39	8.13	7.81	7.81	8.11	8.32	8.42	8.32	8.28	8.20	8.13	8.15	8.27	8.48
	H.angle	178.04	186.08	194.25	203.54	213.00	224.76	234.24	245.99	258.52	270.23	284.91	295.47	304.76	312.93	325.97	334.74	344.69	356.53	364.90	373.72
5	ΔC^*	10.23	9.98	9.75	9.32	9.02	8.62	8.26	7.99	8.04	8.24	8.71	8.63	8.61	8.54	8.52	8.45	8.33	8.32	8.41	8.62
	H.angle	181.08	189.90	197.84	207.74	217.17	229.06	240.03	251.33	263.98	275.34	290.05	300.36	308.71	315.95	325.08	333.25	342.41	354.11	362.61	371.05
3	ΔC^*	9.66	9.47	9.29	9.19	9.02	8.79	8.62	8.48	8.59	8.94	9.50	9.62	9.65	9.62	9.58	9.52	9.41	9.34	9.31	9.42
	H.angle	183.84	193.44	201.83	212.21	222.31	233.54	244.57	255.59	267.73	279.20	293.80	303.66	311.34	317.72	324.42	330.94	340.07	349.39	357.86	377.00
1	ΔC^*	10.84	10.35	9.88	9.39	9.08	8.79	8.69	8.71	8.91	9.41	9.80	9.90	9.93	9.92	9.88	9.85	9.77	9.68	9.36	
	H.angle	186.51	197.96	207.17	218.90	228.06	238.36	248.79	259.70	271.58	282.77	297.34	306.66	313.74	319.52	323.32	327.24	331.57	337.43	342.97	349.11
V=9~1	C.average	10.41	10.10	9.81	9.55	9.26	8.87	8.60	8.37	7.82	7.99	8.31	8.88	8.87	8.87	8.86	8.78	8.70	8.70	8.75	8.65
	H.angle	181.03	189.95	198.52	208.25	217.89	228.92	239.34	250.15	263.40	274.67	289.34	300.04	308.01	314.92	325.11	332.59	341.16	351.29	359.18	369.27
V=9~3	C.average	10.30	10.04	9.80	9.59	9.30	8.90	8.57	8.28	7.55	7.63	7.94	8.62	8.61	8.60	8.59	8.50	8.42	8.43	8.52	8.73
	H.angle	179.67	187.95	196.36	205.59	215.34	226.56	236.98	247.77	261.36	272.64	287.34	298.38	306.58	313.77	325.56	333.93	343.56	354.76	363.23	374.31
正規化	V=9~3	9.80	9.55	9.32	9.13	8.85	8.47	8.16	7.88	7.19	7.26	7.56	8.20	8.19	8.18	8.09	8.01	8.02	8.11	8.31	
	補正系数	1.020	1.047	1.072	1.096	1.130	1.181	1.226	1.269	1.391	1.377	1.323	1.219	1.221	1.204	1.236	1.248	1.247	1.233	1.204	

4. 3 CIELAB クロマスケールの補正関数 $F(C)$ の導出

表 4.2 のマンセル表色系の等色相面における隣接色票の平均クロマ差 (C.average) と平均色相角 (H.angle) との関係を図 4.2 に示す。図 4.2 の縦軸の変動比率は、正規化した平均クロマ差 (C.average) を十分の一にした値を示しており、図 4.1 の逆数に相当する。ただし、表 4.2.2 に見られるように明度 $V=9$ の色相角には、 $250^\circ \sim 280^\circ$ の範囲で大きな変化が見られる。この色相範囲では最高彩度が $C=2$ であり、後述する彩度 $C=0$ の色座標 $(a^*, b^*) = (0,0)$ が色相環の中心と一致しない、無彩色点の偏心の影響によるものである。図 4.2 はそれらを含んだ平均的な特性を示している。図 4.2 の近似曲線は、後述する式 (4-1) による結果を示している。

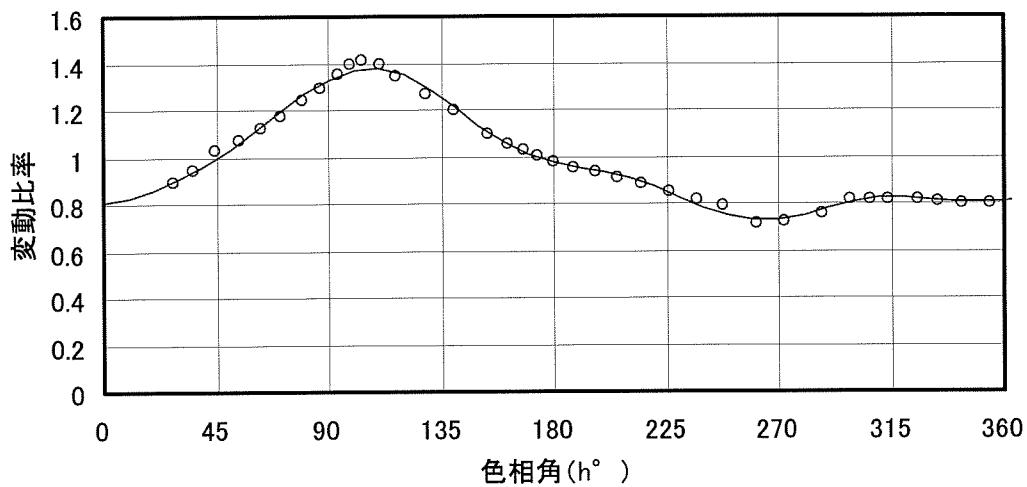


図 4.2 彩度差 (ΔC^*) 2 ステップの色相角依存性

図 4.2 から平均色相角の変化による隣接色票の平均クロマ差 (C.average) の変化には周期性があり、色相角の関数として近似できることが推定される。マンセル表色系の色相が赤一黄一緑一青一紫一赤のように連続して変化する色相の循環性を持っていることから、図 4.2 の色相角依存性は色相角 0° から 360° を周期とする周期関数として考えることができる。一般に、色相角 0° を Y 軸 (縦軸) として、マイナス方向に線対称となる関数を仮定することによって偶関数拡張をすることができる。偶関数はフーリエ級数の性質²⁾から余弦関数として表すことができることから、図 4.2 を余弦関数の重ね合わせで表すことを考える。ただし、関数近似においては、 $f(t) = \sum A_n \cos(n\omega t + \phi_n)$ の一般式で表される式の項数を増減させながら最小二乗法によって最適近似する方法を用いた。得られた近似式及び係数 a_i 並びに θ_i を (式 4-1) 及び表 4.3 に示す。式中の、 $F(C)$ は各等色相面にお

ける明度 $V=9 \sim 3$ までの ΔC^* を十分の一にした値、 h は色相角 ($h = \tan^{-1}(b^*/a^*)$)である。ここで、色相角 h 及び θ_i の単位は CIE の定義に従って、角度を用いている。

$$F(C) = a_0 + a_1 \cos(h + \theta_1) + a_2 \cos(2h + \theta_2) + \\ a_3 \cos(3h + \theta_3) + a_4 \cos(4h + \theta_4) \quad (4 \cdot 1)$$

表 4.3 $F(C)$ の係数 β_i の推定値

A_0	a_1	θ_1	a_2	θ_2	a_3	θ_3	a_4	θ_4
0.972360	-0.267730	70	-0.090280	-35	-0.048056	-100	-0.021171	60

表 4.3 の係数を用いて式(4・1)によって補正した明度 $V=5$ のマンセルグリッドを図 4.3 に示す。図 3.2 (再掲) のグリッドと比較すると、 b^* 軸方向の等間隔性が改良されていることが明らかである。しかし、 b^* 軸に沿った色相 5Y の彩度 $C=12$ (図 4.3 で b^* の値が約 70 の等彩度線に相当する。) の間に歪みが見られる。この歪みは、色相環に欠落が見られる彩度 $C=14$ 以上の高彩度領域で顕著に見られる。マンセル表色系は、彩度 $C=10$ (図 4.3 で b^* の値が約 50 の等彩度線に相当する。) を最高彩度に設定し、高彩度領域の基準を補外法によって決定している影響と考えられる。図 3.2 のマンセルグリッドにおけるこの領域 (図 3.2 で b^* の値が約 90 の等彩度線に相当する。) での等間隔性の歪みは、CIELAB クロマスケールの不等間隔性を考慮しても顕著であり、マンセル表色系にも、問題があることが推定される。

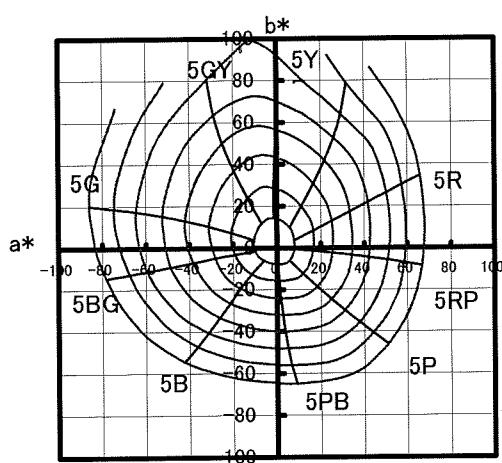


図 3.2 CIELAB のマンセルグリッド

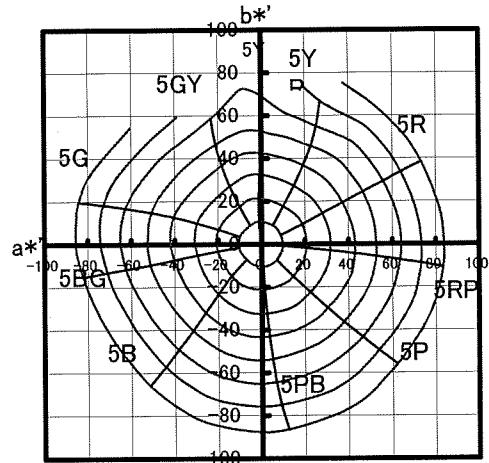


図 4.3 修正クロマスケールを用いた
マンセルグリッド

クロマスケールの改良の程度を数量的に検討するために、池田ら³⁾と同様に、式(4・2)及び式(4・3)によって各彩度における平均クロマ (C_M) とその標準偏差を求め、平均クロマに対する標準偏差 (STDEV) の比率をクロマスケールの色相依存性の指標 (I) として解析した。

$$C_M = \sum (x_i^2 + y_i^2)^{1/2} / 40 \quad (4 \cdot 2)$$

$$\text{STDEV} = \sum \{(x_i^2 + y_i^2)^{1/2} - C_M\}^2 / 40 \quad (4 \cdot 3)$$

ここに、 x_i 、 y_i は、各彩度における色相環の色座標 a^* 、 b^* の値、 Σ の範囲は 40 色相に対応する $i=1 \sim 40$ である。

$$I = \text{STDEV} / C_M \quad (4 \cdot 4)$$

CIELAB 及び式 (4・1) を用いて補正した修正クロマスケールによる計算結果を表 4.4 及び図 4.4 並びに図 4.5 に示す。明度 $V=3$ 以下で低彩度 $C=3$ 以下の値を除いては、CIELAB に比較して修正クロマスケール（表中では NEW で表している。）による I の値は小さく、等彩度線がより真円に近く表示されていることを示している。

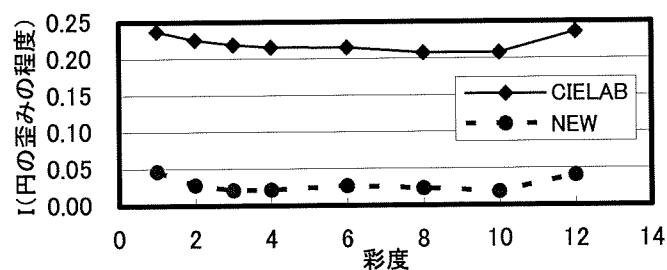


図 4.4 等彩度線の円からの歪みの程度 ($V=5$ の例)

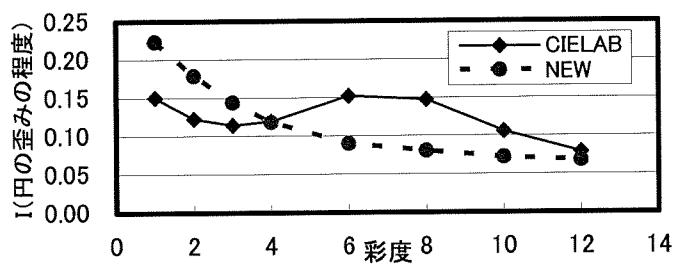


図 4.5 等彩度線の円からの歪みの程度 ($V=3$ の例)

また、各明度の平均クロマの総平均を計算し、隣接する彩度の色差を求めるところ表 4.5 及び図 4.6 のようになる。総平均値が $\Delta E^*=10.6$ になっていることから、修正クロマスケールによる隣接色票のクロマ差は、 $\Delta C=2$ が $\Delta C^*=10$ に対応するようなスケールと考えることができる。

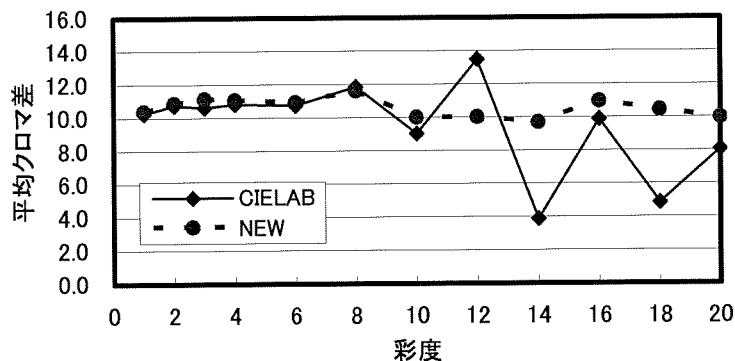


図 4.6 隣接する彩度の色差

表 4.4 色相環の平均クロマと円の歪みの程度

色空間	明度		彩度							/12	/14	/16	/18	/20	
			/1	/2	/3	/4	/6	/8	/10						
CIELAB	9	AVE	4.87	10.18	16.37	22.42	35.53	53.42	65.33	81.15					
		STDEV	2.91	4.65	5.59	6.11	7.77	6.35	8.67	8.68					
		RATIO	0.597	0.457	0.342	0.273	0.219	0.119	0.133	0.107					
NEW	9	AVE	4.50	9.66	15.53	21.54	32.98	44.87	55.23	65.55					
		STDEV	2.01	2.73	2.63	2.08	2.14	1.92	1.42	1.77					
		RATIO	0.445	0.282	0.169	0.097	0.065	0.043	0.026	0.027					
CIELAB	7	AVE	4.99	10.05	15.16	20.28	30.38	40.76	51.45	63.25	75.71	89.10			
		STDEV	1.91	3.34	4.48	5.43	7.30	9.23	11.43	13.21	15.45	18.39			
		RATIO	0.383	0.333	0.295	0.268	0.240	0.226	0.222	0.209	0.204	0.206			
NEW	7	AVE	4.83	9.82	14.93	20.08	30.24	40.72	51.48	62.04	72.15	83.20			
		STDEV	0.96	1.40	1.49	1.39	1.09	1.11	1.69	1.65	1.44	2.41			
		RATIO	0.199	0.142	0.100	0.069	0.036	0.027	0.033	0.027	0.020	0.029			
CIELAB	5	AVE	5.02	10.13	15.31	20.56	31.13	41.67	51.86	63.83	67.66	75.19	85.01	93.10	
		STDEV	1.19	2.28	3.36	4.43	6.69	8.66	10.78	15.06	11.11	9.94	11.87	9.89	
		RATIO	0.237	0.226	0.219	0.215	0.215	0.208	0.208	0.236	0.164	0.132	0.140	0.106	
NEW	5	AVE	5.03	10.18	15.42	20.71	31.38	42.04	52.28	63.99	73.32	84.31	95.46	105.46	
		STDEV	0.23	0.28	0.32	0.44	0.83	0.96	0.96	2.60	1.64	1.73	2.11	1.99	
		RATIO	0.047	0.028	0.021	0.021	0.026	0.023	0.018	0.041	0.022	0.020	0.022	0.019	
CIELAB	3	AVE	5.45	10.89	16.27	21.56	31.90	40.74	48.85	57.19	67.36	76.14			
		STDEV	0.82	1.34	1.86	2.58	4.86	6.01	5.18	4.51	5.97	3.55			
		RATIO	0.150	0.123	0.114	0.120	0.152	0.147	0.106	0.079	0.089	0.047			
NEW	3	AVE	5.73	11.41	16.98	22.41	32.91	43.99	54.94	65.75	76.63	87.53			
		STDEV	1.28	2.04	2.44	2.65	2.97	3.55	3.98	4.47	4.95	5.15			
		RATIO	0.223	0.179	0.144	0.118	0.090	0.081	0.072	0.068	0.065	0.059			
CIELAB	1	AVE	5.30	11.26	15.96	21.30	30.89	42.55	46.78						
		STDEV	1.55	2.38	2.10	3.14	3.72	9.14	0.94						
		RATIO	0.292	0.211	0.131	0.148	0.120	0.215	0.020						
NEW	1	AVE	5.90	12.13	18.25	24.03	35.90	49.89	57.61						
		STDEV	2.43	3.30	3.45	2.68	1.55	5.55	1.31						
		RATIO	0.413	0.272	0.189	0.111	0.043	0.111	0.023						

注) 表中の網かけ表示は、色相環の一部に欠落値のある彩度であることを示す。

表 4.5 彩度別の平均クロマと隣接クロマ差

色空間		彩度												平均値	標準偏差
		/1	/2	/3	/4	/6	/8	/10	/12	/14	/16	/18	/20		
CIELAB	クロマ	5.13	10.50	15.82	21.22	31.97	43.83	52.86	66.35	70.24	80.14	85.01	93.10	9.53	2.754
	隣接クロマ差	10.25	10.75	10.62	10.82	10.74	11.86	9.03	13.50	3.89	9.90	4.87	8.09		
NEW	クロマ	5.20	10.64	16.22	21.76	32.68	44.30	54.31	64.33	74.04	85.02	95.46	105.46	10.60	0.589
	隣接クロマ差	10.40	10.88	11.16	11.07	10.93	11.62	10.01	10.03	9.70	10.98	10.45	10.00		

池田らは、視覚系における反対色過程とその非線形性を考慮して開発した NC-III C³⁾の結果として、明度 $V=6$ 、彩度 $C=8$ では $I=0.0426$ であることを報告している。明度が異なるために、結果を直接比較することができないが、表 4.4 の明度 $V=5$ 、彩度 $C=8$ 及び明度 $V=7$ 、彩度 $C=8$ の I の値は、 $I=0.023$ 及び $I=0.027$ であり、式(4・1)によって補正した結果は、より真円に近い結果になっている。このことから、式(4・1)によって補正した修正クロマスケールは、マンセル表色系の彩度を近似的に表示できる心理メトリック量（相関量）とみなすことができる。

CIELAB と比較して、低明度 ($V=3$ 以下)、低彩度 ($C=3$ 以下) で、 I の値が大きくなっている原因は、次の理由によるものと考えられる。図 3.2 に見られるように、彩度 $C=0$ の色座標が $(a^*, b^*) = (0,0)$ にならず、やや偏心⁴⁾ している。この無彩色の偏心の程度は、明度 $V=5$ より明度が大きくて小さくても、明度 $V=5$ からの明度差が大きくなるに従って大きくなる傾向が見られる。マンセル表色系の無彩色点は、補助標準イルミナント C の色度座標で規定されており、補助標準イルミナント C の色座標を計算すると、 $(a^*, b^*) = (0,0)$ になる。このことから、無彩色の偏心は、補助標準イルミナント C の色度座標から計算される測色上の無彩色点と真円で示される等彩度（クロマ）線の中心点に相当する無彩色知覚（彩度 $C=0$ の無彩色点）とが一致しないことを意味する。

等彩度（クロマ）線から推定される彩度 $C=0$ の無彩色点の色座標が $(a^*, b^*) = (0,0)$ になるように移動して I を求めると表 4.6 のようになる。表 4.6 の補正方法 I は、色相環に欠落が生じない各彩度の等彩度（クロマ）線の色座標 (a^*, b^*) を平均した中心点を求め、その軌跡から彩度 0（無彩色点）に相当する色座標を推定する方法（無彩色点補正方法 I）である。補正方法 II は、無彩色知覚に近い彩度 $C=2$ の等彩度（クロマ）線の色座標 (a^*, b^*) を平均した中心点から推定する方法（無彩色点補正方法 II）である。また、 $C=1$ 及び $C=3$ の隣接クロマ差は、彩度差 $\Delta C=2$ の値にそろえるために、隣接クロマ差を 2 倍して彩度差 $\Delta C=2$ に換算した値を示している。

表 4.4 と表 4.6 から明度 $V=3$ について、無彩色点補正方法 II による等彩度線の歪みの程度と CIELAB の歪みの程度とを比較した例を図 4.7 に示す。無彩色知覚（彩度 $C=0$ の無彩色点）の色座標が $(a^*, b^*) = (0,0)$ に一致するようにした I の値は、CIELAB と比較して小さく、修正クロマスケールの有効性を確認するこ

とができる。

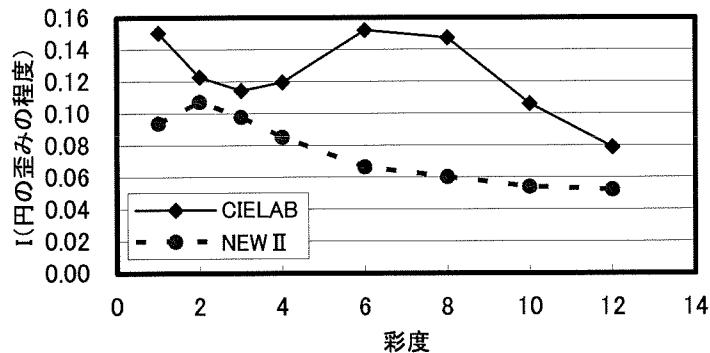


図 4.7 等彩度線の円からの歪みの程度 (V=3)

表 4.6 色相環の偏心を補正した場合の、平均クロマと円の歪みの程度

補正方法	明度		彩度											
			/1	/2	/3	/4	/6	/8	/10	/12	/14	/16	/18	/20
I	9	AVE	4.43	9.57	15.37	21.38	32.67	44.20	54.56	64.81				
		STDEV	1.48	2.20	2.12	1.63	1.82	1.97	1.49	1.82				
		RATIO	0.334	0.229	0.138	0.076	0.056	0.045	0.027	0.028				
II	9	AVE	4.64	9.54	15.13	21.11	32.07	42.53	52.82	62.98				
		STDEV	0.55	0.88	0.83	0.87	1.33	1.86	1.49	1.78				
		RATIO	0.119	0.092	0.055	0.041	0.041	0.044	0.028	0.028				
I	7	AVE	4.80	9.79	14.90	20.05	30.21	40.69	51.45	61.99	72.06	83.08		
		STDEV	0.80	1.23	1.34	1.25	0.98	1.07	1.72	1.69	1.40	2.37		
		RATIO	0.166	0.126	0.090	0.062	0.032	0.026	0.034	0.027	0.019	0.029		
II	7	AVE	4.81	9.72	14.80	19.93	30.09	40.57	51.34	61.75	71.65	82.48		
		STDEV	0.55	0.51	0.63	0.72	0.94	1.40	2.13	2.16	1.63	2.46		
		RATIO	0.114	0.052	0.043	0.036	0.031	0.035	0.041	0.035	0.023	0.030		
I	5	AVE	5.03	10.18	15.42	20.71	31.38	42.04	52.28	63.99	73.32	84.31	95.46	105.45
		STDEV	0.26	0.30	0.33	0.44	0.81	0.94	0.95	2.60	1.64	1.73	2.13	2.01
		RATIO	0.052	0.030	0.021	0.021	0.026	0.022	0.018	0.041	0.022	0.021	0.022	0.019
II	5	AVE	5.00	10.13	15.36	20.65	31.32	41.97	52.21	63.93	73.43	84.50	95.64	105.63
		STDEV	0.59	0.61	0.65	0.76	1.11	1.31	1.33	2.54	1.90	1.97	2.28	2.11
		RATIO	0.118	0.060	0.042	0.037	0.035	0.031	0.025	0.040	0.026	0.023	0.024	0.020
I	3	AVE	5.73	11.40	16.97	22.41	32.91	43.99	54.94	65.75	76.62	87.51		
		STDEV	1.21	1.97	2.38	2.59	2.91	3.48	3.90	4.39	4.87	5.06		
		RATIO	0.212	0.173	0.140	0.116	0.088	0.079	0.071	0.067	0.064	0.058		
II	3	AVE	5.81	11.43	16.98	22.41	32.89	43.91	54.85	65.63	76.42	87.20		
		STDEV	0.54	1.22	1.66	1.91	2.19	2.64	2.97	3.43	3.88	4.00		
		RATIO	0.094	0.107	0.098	0.085	0.067	0.060	0.054	0.052	0.051	0.046		
I	1	AVE	5.90	12.10	18.02	23.79	35.55	49.42	56.81					
		STDEV	1.73	2.68	2.84	2.20	1.57	6.09	1.09					
		RATIO	0.294	0.221	0.158	0.093	0.044	0.123	0.019					
II	1	AVE	6.10	12.13	17.87	23.61	35.22	48.57	54.79					
		STDEV	0.43	1.0	1.05	0.96	2.40	7.71	1.32					
		RATIO	0.070	0.088	0.059	0.040	0.068	0.159	0.024					

注 1) 表中の網かけ表示は、各色相の一部に欠落値のある彩度であることを示す

注 2) 補正方法 I は、各彩度の重心から推定した無彩色点、II は彩度 2 の重心を用いて補正した結果を示す。

表 4.5 と同様に、隣接する彩度の色差を求めるとき表 4.7 のようになる。表 4.6 及び表 4.7 から、彩度 $C=2$ の色相環の中心点から無彩色点を補正した方法 II による標準偏差の値が 0.448 と小さく、より良い結果を示している。無彩色点補正方法 II による隣接する彩度の色差と CIELAB の隣接する彩度の色差とを比較した例を図 4.8 に示す

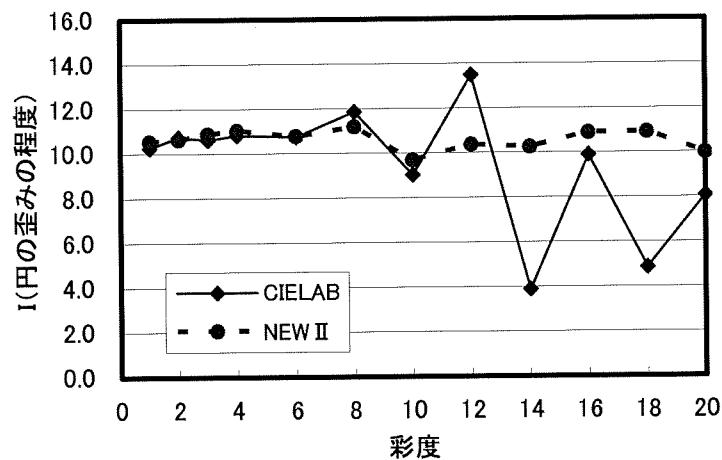


図 4.8 無彩色点補正方法 II による隣接する彩度の色差

表 4.7 彩度別の平均クロマと隣接クロマ差

補正方法		彩度												平均値	標準偏差
		/1	/2	/3	/4	/6	/8	/10	/12	/14	/16	/18	/20		
I	クロマ	5.18	10.61	16.14	21.67	32.54	44.07	54.01	64.13	74.00	84.96	95.46	105.45	10.59	0.538
	隣接クロマ差	10.36	10.86	11.05	11.07	10.87	11.52	9.94	10.13	9.87	10.96	10.49	9.99		
II	クロマ	5.27	10.59	16.03	21.54	32.32	43.51	53.20	63.57	73.83	84.73	95.64	105.63	10.60	0.448
	隣接クロマ差	10.54	10.64	10.87	11.03	10.78	11.19	9.69	10.37	10.26	10.89	10.92	9.99		

補正方法による違いは、各彩度の等彩度線から求められる色相環の中心は同じ値ではなく、図 4.9 のように系統的に変化していることが原因と考えられる。図 4.9 の軌跡から無彩色点を推定する無彩色点補正方法 I の推定値には、彩度が大きくなるに従って、知覚的な無彩色の判断が曖昧になることによる尺度構成上の誤差が含まれていることが推定される。このため、無彩色点を感覚的に知覚しやすい彩度 $C=2$ の等彩度線の中心点を用いる無彩色点補正方法 II による補正が、低彩度領域で有効であったと考えられる。

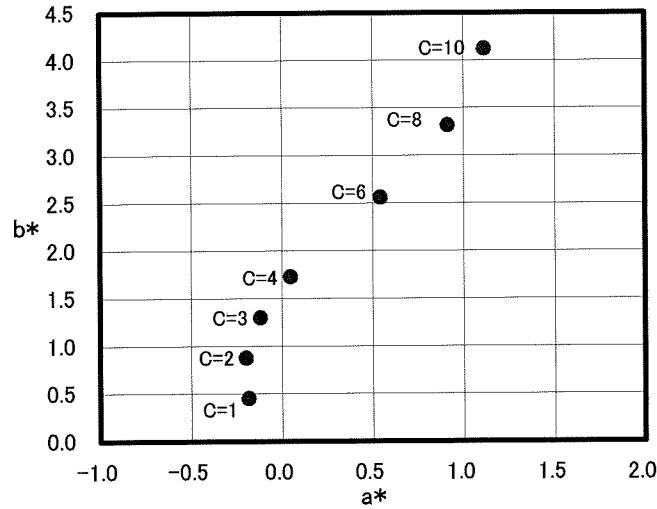


図 4.9 マンセル表色系の明度 $V=5$ の等彩度線の中心点の変化

ただし、彩度 $C=1 \sim C=20$ で比較した場合には、 $C=6$ 以上で無彩色点補正方法 I による補正の歪みが小さくなる傾向が見られる。また、JIS に採用されているマンセル表色系の彩度 $C=1$ 及び $C=3$ の色度座標は彩度 $C=0$ の無彩色点の色度座標が $(a^*, b^*) = (0,0)$ として、彩度 $C=2$ 以上のデータから三次補間方法によって規定されている。このため、図 4.9 の彩度 $C=1$ の色度座標の軌跡からも推測されるように、無彩色点の偏心を強制的に補正したデータになっている。彩度 $C=1$ のデータに、無彩色点補正方法 II を適用すると、彩度 $C=1$ の色相角の変化に不規則性が生じ、色相環の並びが逆転する歪みが生じる。これらを考慮すると、どちらの補正方法が優位であるかは即断できない。本研究の目的は、均等色差空間の開発にあり、マンセル表色系の改良を目的としたものではないので、4.4 節の無彩色点の偏心が生じる原因の考察にとどめ、無彩色知覚の観測実験を含めたマンセル表色系の改良については別の機会に検討することにする。

補正方法によって大きな違いが生じる明度 $V=9$ の例を図 4.10～図 4.12 に示す。また、無彩色点を補正しない場合、無彩色点補正方法 I 及び方法 II で補正した場合の明度 $V=9 \sim V=1$ までのマンセルグリッドを付録 2 に示す。図 4.10 では、無彩色点の偏心が明らかに見られ、図 4.11、図 4.12 と偏心が少なくなる結果になっている。

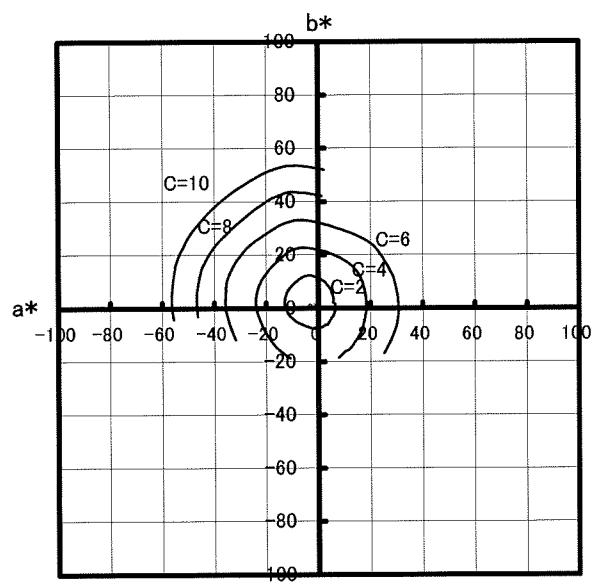


図 4.10 無彩色点補正をしない修正クロマスケールによるマンセルグリッド ($V=9$)

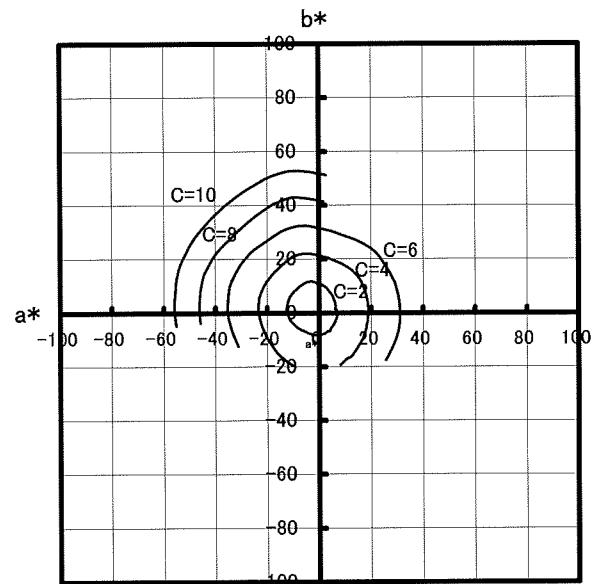


図 4.11 無彩色点補正方法 I を加えた修正クロマスケールによるマンセルグリッド ($V=9$)

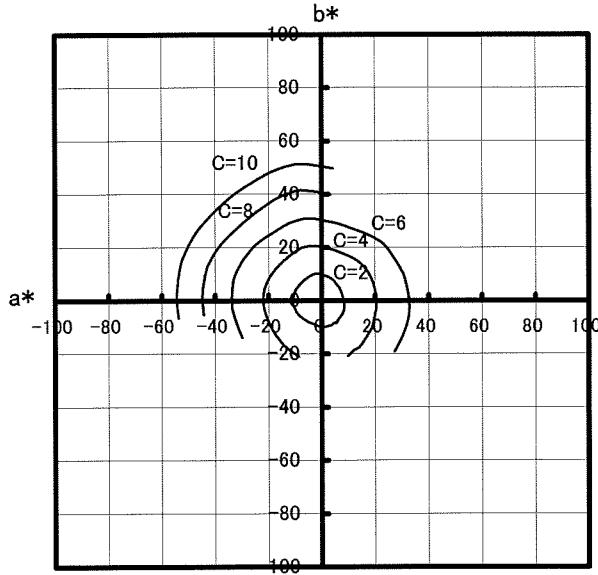


図 4.12 無彩色点補正方法 II を加えた修正クロマスケールによるマンセルグリッド (V=9)

4. 4 無彩色点に偏心が生じる原因

色相環の中心は知覚的な無彩色点と考えられることから、マンセル表色系における尺度構成の際に、無彩色知覚が明度によって偏心するような要因が存在したこが推定される。色知覚に変化をもたらす要因として、照明光の色度（光色）、観察面の照度、刺激（観察色）の大きさ、刺激の配置及び刺激の背景などが知られている。これらの要因によって、知覚色がどのように変化するかを予測する方法として CIE 色順応予測式⁵⁾が用いられている。色順応は目の感度調整として知られているもので、太陽光の下で見ている背広などの色が、電灯の下でもほぼ同じような色に知覚される現象をいう。太陽光と電灯で照明された背広から反射される光の物理的特性はかなり変化しているにもかかわらず、色の知覚に大きな変化は生じない。例えば、太陽光の屋外から、電灯で照明されている室内に入ると、始めは全体が赤みがかった印象を受けるが、しばらくすると赤みがかった印象が消え、白い紙も白として知覚される。電灯の光に眼がなれて、眼の分光感度が調整されることによって、色の恒常性が保たれる現象を色順応という。この眼の調節は、照明光による影響だけでなく、観察する対象が置かれている背景の違いによっても起こる。この色知覚の変化を予測する方法を色順応予測式といふ。

CIE 色順応予測式の原理を以下に述べる。図 4.13 は、左眼が試験光に右眼が基準光に順応している状態を示している。試験光の下に置かれた試験色の色知覚と

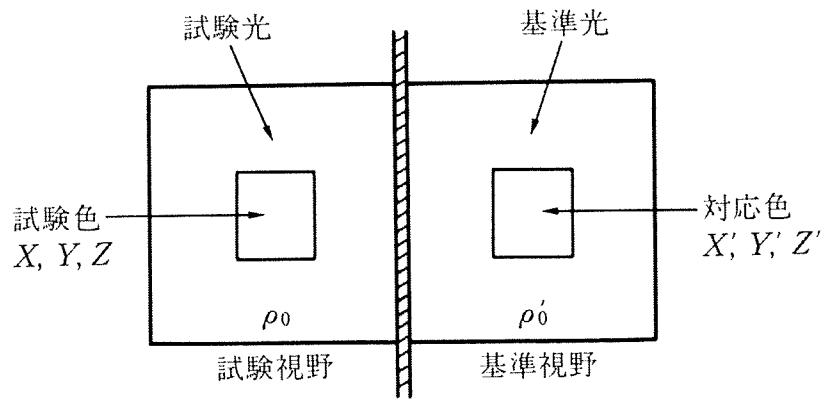


図 4.13 CIE 色順応予測式における試験色と対応色の関係

同じ色知覚に見える基準光の下に置かれた色を対応色と呼んでいる。この対応色を推定する方法を色順応予測式という。具体的な予測の手順は次の 3 段階からなる。

- (a) 試験色の三刺激値 X, Y, Z を基本分光感度に基づく三刺激値 R, G, B に式 (4-5) により変換する。基本分光感度⁶⁾は、眼の網膜にある受光器（錐状体）の分光感度である。

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.40024 & 0.70760 & -0.08081 \\ -0.22630 & 1.16532 & 0.04570 \\ 0 & 0 & 0.91822 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (4 \cdot 5)$$

- (b) 試験色の三刺激値 R, G, B から、式 (4-6) の非線形変換により、対応色の三刺激値 R', G', B' を求める。

$$\begin{aligned} R' &= (100 \rho_0 \cdot \xi' + 1) \{ (R + 1) / (100 \rho_0 \cdot \xi + 1) \}^{P_r} - 1 \\ G' &= (100 \rho_0 \cdot \eta' + 1) \{ (G + 1) / (100 \rho_0 \cdot \eta + 1) \}^{P_g} - 1 \\ B' &= (100 \rho_0 \cdot \zeta' + 1) \{ (B + 1) / (100 \rho_0 \cdot \zeta + 1) \}^{P_b} - 1 \end{aligned} \quad (4 \cdot 6)$$

ただし、 ρ_0 は、図 4.13 の試験視野の灰色背景の反射率であり、 ξ, η, ζ は式 (4-7) によって求める。

$$\begin{aligned}\xi &= (0.48105x + 0.78841y - 0.08081)/y \\ \eta &= (-0.27200x + 1.11962y + 0.04570)/y \\ \zeta &= 0.91822(1-x-y)/y\end{aligned}\tag{4-7}$$

ただし、 x 、 y は試験光の色度座標である。また、式(4-6)の ξ' 、 η' 、 ζ' は、基準光の色度座標を用いて式(4-7)を用いて求める。非線形変化のべき P_r 、 P_g 、 P_b は、式(4-8)により求める。

$$\begin{aligned}P_r &= f(R_0)/f(R_0') \\ P_g &= f(G_0)/f(G_0') \\ P_b &= g(B_0)/g(B_0')\end{aligned}\tag{4-8}$$

ただし、 $f(x)$ 、 $g(x)$ は、

$$\begin{aligned}f(x) &= (6.469 + 6.362x^{0.4495})/(6.469 + x^{0.4495}) \\ g(x) &= (8.414 + 8.091x^{0.5128})/(8.414 + x^{0.5128})\end{aligned}\tag{4-9}$$

であり、 R_0 、 G_0 、 B_0 及び R_0' 、 G_0' 、 B_0' は試験視野と基準視野の輝度で、式(4-10)による。式(4-10)の E と E' は試験視野と基準視野の照度(lx)である。

$$\begin{aligned}\begin{pmatrix} R_0 \\ G_0 \\ B_0 \end{pmatrix} &= \rho_0 \cdot E / \pi \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} R_0' \\ G_0' \\ B_0' \end{pmatrix} &= \rho_0' \cdot E' / \pi \begin{pmatrix} \xi' \\ \eta' \\ \zeta' \end{pmatrix}\end{aligned}\tag{4-10}$$

(c) 対応色の三刺激値 R' 、 G' 、 B' から、式(4-11)により三刺激値 X' 、 Y' 、 Z' を求める。

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.85995 & -1.12939 & 0.21990 \\ 0.36119 & 0.63881 & 0 \\ 0 & 0 & 1.08906 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{pmatrix} \quad (4-11)$$

マンセル表色系における尺度構成では、明度に関係なく同じ刺激の大きさ、刺激の配置を使用していることから、照明光の色度（光色）、観察面の照度、及び視野の背景が色知覚に影響を及ぼしている要因と考えられる。更に、刺激の背景が無彩色の場合の色知覚への影響は、主として明るさの知覚に影響を与えるため、無彩色知覚の変化には、照明光の色度（光色）及び観察面の照度への順応による影響が大きい。

全ての色相について基準値が決められており、色相環に欠落が生じない各彩度の等彩度（クロマ）線の中心点の軌跡から推定される無彩色点と対応色を比較した結果を図 4.14 に示す。図 4.14 の●印は、図 4.9 の無彩色点の軌跡から予測した各明度の推定無彩色点（無彩色点補正方法 I）を示している。実線は近似式による明度が異なる推定無彩色点の軌跡を示す。◆印は観察面の照度の変化による対応色を示す。マンセル表色系の尺度構成に用いられている補助標準イルミナント C で、500lx の照度で照明されている無彩色で、明度 1 (N1) ~ 明度 9 (N9) の、補助標準イルミナント C で 1,000lx の照度下での対応色の色座標を示す。□印は照明光の色度の変化による対応色を示す。補助標準イルミナント C で、1,000lx の照度で照明されている明度 1 (N1) ~ 明度 9 (N9) の、同照度 1,000lx の等エネルギー白色光下での対応色を示す。図 4.14 から、色相環に欠落が生じない各彩度の等彩度（クロマ）線の中心点の軌跡から推定された推定無彩色点の変化は、照明光の色度による対応色（□印）の変化とは異なり、観察面の照度による対応色（◆印）の変化の傾向と近似している。無彩色点の偏心は、尺度構成時の色票を観察する照度に依存していることが推定される。このような現象は、これまで報告されたことがなく注目される結果といえる。しかし、マンセル表色系の基になっている色票の観察がどの程度の照度下で行われたかについての報告がないため、正確な値がわからないことから、無彩色の偏心が観察面の照度に依存していると結論づけることができない。ただし、マンセル表色系が考案された 1905 年から色票集が出版されるようになった 1929 年当時の状況では、それほど高い照度の下で観察が行われたとは考えにくく、無彩色に近い低彩度の色票の知覚に、照度による色順応効果が影響していることを否定することはできない。

図 4.14 に示した照度による色順応効果から推定される各明度（明度指数 L^* ）の無彩色点の偏心を推定する予測式を式(4-12)及び式(4-13)に示す。式 (4-12) 及

び式(4-13)は、図4.14の推定無彩色点の変化から重回帰分析によって求めた回帰式である。彩度 $C=2$ の色相環の中心点から得られる無彩色点の偏心についても、式(4-12)及び式(4-13)と同様に明度指数 L^* の関数として無彩色点を推定することができる。これらの回帰式を用いることによって、任意の明度指数 L^* に対応した無彩色点の補正が可能になる。しかし、式(4-12)及び式(4-13)を適用するには、知覚実験による無彩色点の偏心に関する検討を行う必要がある。本研究では、4.3節で検討した無彩色点補正方法を用いることにする。

$$a^* = 0.000002495 \times L^{*3} - 0.0005493 \times L^{*2} + 0.01155 \times L^* + 0.5244 \quad (4-12)$$

$$b^* = -0.0000003004 \times L^{*3} + 0.00007392 \times L^{*2} - 0.001097 \times L^* - 0.9726 \quad (4-13)$$

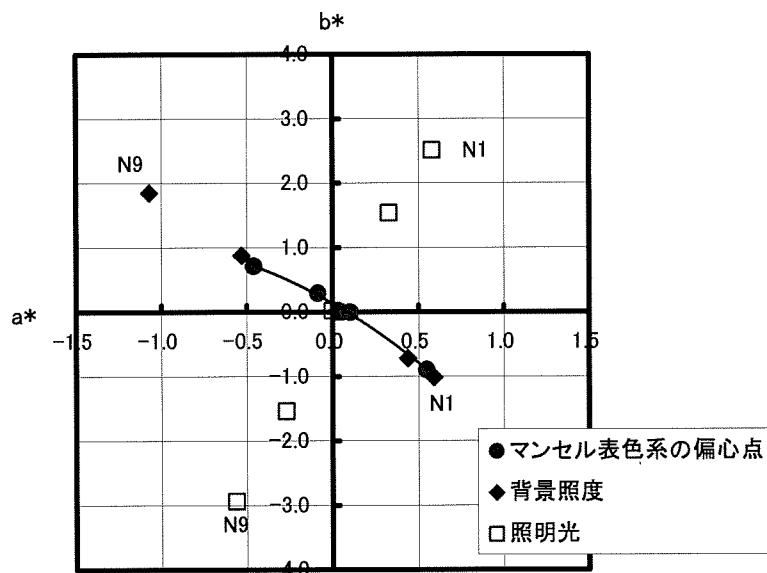


図4.14 マンセル表色系の推定無彩色点と背景照度及び照明光の色度が変化したときの対応色の関係

4.5 結論

マンセル表色系の色票の三刺激値の基準値から、明度 $V=9 \sim 3$ の色相ごとに彩度 $\Delta C=2$ のクロマ差を計算した結果、彩度 $\Delta C=2$ のクロマ差が色相によって変動していることを明らかにした。この結果は、CIELABのクロマ差を、マンセル表色系の彩度差の相關量として用いることができないことを意味している。彩度 $\Delta C=2$ のクロマ差は、CIELABのメトリック色相角 (h°) の変化によって、連続的で滑らかな変化をする。この変化を余弦関数で近似できることを示した。彩度

$\Delta C=2$ のクロマ差から、最小二乗法によって得られた補正関数 $F(C)$ を用いて計算した彩度 $\Delta C=2$ のクロマ差の色相による変化を検証した。その結果、各等彩度線は概ね真円と見なすことができることから、色相の変化によらず、クロマ差がほぼ同じ値になることを示した。また、等色相線の隣接する彩度間のクロマ差もほぼ等間隔になっていることから、補正関数 $F(C)$ を用いて計算される修正クロマスケールによるクロマ差は、マンセル表色系の彩度の相関量として用いることができるこことを明らかにした。これによって、修正クロマスケールを、マンセル表色系の等歩度性に着目した均等色差空間のクロマスケールとして、色相差の等歩度性を検討するための基本とすることにする。

補正関数 $F(C)$ の検討において、マンセル表色系の色相環の中心と CIELAB の無彩色の色座標 $(a^*, b^*) = (0,0)$ とが一致せずに、偏心していることを明らかになった。この偏心によって、彩度 $C=3$ 以下の低彩度領域での等彩度線が真円から歪んでしまうことから、その補正方法を提案した。また、この偏心がマンセル表色系の尺度構成時における観察条件の順応効果によるものであることを、CIE 色順応予測式を使って明らかにした。

参考文献

- 1) JIS Z 8730 色の表示方法－物体色の色差 (2002)
- 2) 例えば、春日 隆：共立出版(1993)
- 3) 池田、小原：照学誌,78[2],66(1994)
- 4) T.Seim et al : Color Res. Appl.,11[1],11(1986)
- 5) Publication CIE No.109 A method of predicting corresponding colour under different chromatic and illuminance adaptation(1994)
- 6) 池田光男：朝倉書店(1980)

第5章 修正クロマスケールを用いた色相スケールの補正関数

5. 1 序論

CIELAB のクロマスケールを式(4-1)によって補正することによって、マンセル表色系の彩度差 $\Delta C=2$ がクロマ差 $\Delta C^*=10$ に対応するような新しい修正クロマスケールを示した。修正クロマスケールを用いることによって色相や明度に関係なく、マンセル表色系の彩度差に相関するクロマ差を求めることができる。しかし、図 3.2 からわかるようにマンセル表色系の隣接する色の色相差は、色相及び彩度によって変化している。第 4 章の解析に用いたマンセル表色系の色票の三刺激値に、式(4-1)によるクロマスケールの補正を行い、隣接するメトリック色相差を計算して色相スケールの検討を行った。

なお、本研究では、マンセル表色系の色相差と CIELAB におけるメトリック色相差を区別するために、前者に「色相差」、後者に「メトリック色相差」の用語を用いる。

5. 2 隣接する色相差の色相角依存性

明度の等しい等明度面ではマンセル表色系の色相は、図 3.2 及び図 4.3 のように無彩色点を中心とする色相の等しい色を結んだ放射線状に延びる等色相線として表すことができる。また、マンセル表色系の隣接する色のメトリック色相差 (ΔH^*) は、CIELAB 上ではクロマ(彩度)の大きさに依存して変化する。このため、色相スケールを検討するには、メトリック色相差 (ΔH^*) のクロマによる変化を除いた値で行う必要がある。修正クロマスケールではクロマ (C^*) が彩度に比例するように改良されているため、メトリック色相差 (ΔH^*) はクロマ (C^*) に比例して大きくなる。従って、メトリック色相差 (ΔH^*) をクロマ (C^*) で規準化することによって、メトリック色相差 (ΔH^*) のクロマによる変化を補正することができる。

図 5.1 にクロマスケールの補正を行ったのちに計算したメトリック色相差 (ΔH^*) を、クロマ (C^*) で規準化した値 ($\Delta H^*/C^*$) の色相角による変化の様子を示す。 ΔH^* はマンセル表色系の明度及び彩度の等しい隣接する色のメトリック色相差を、 C^* は色相差を計算した隣接する色の修正クロマスケールによる平均クロマを示す。横軸の色相角は、CIELAB の色相に相関する量であるメトリック色相角 (h°) で、メトリック色相差を計算した隣接する色の平均メトリック色相角で表している。メトリック色相角 50° 及び 150° 前後に見られるバラツキは、色票の三刺激値が規定されていないために色相環に欠落が見られる色相の前

後でメトリック色相差が大きくなるため、マンセル表色系の歪みを表している。また、メトリック色相角 320° 前後に見られる明度 9 及び明度 7 のバラツキは、色相 5P と 7.5P の間で生じているもので、他の色相と比較して両者の間隔が広く、色相線の彎曲が異なることに起因している。このような現象が色相知覚とどのように関係しているかは不明であるが、彩度によって色相知覚が変化するアブニーエff果との関係が考えられる。

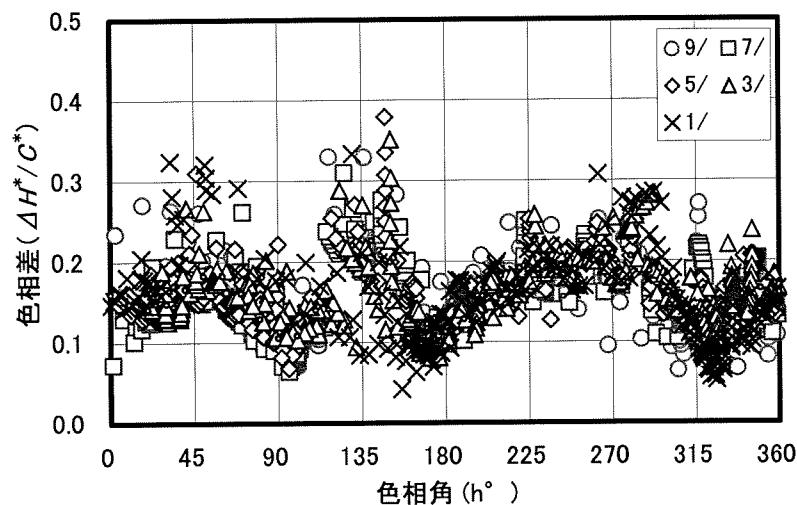


図 5.1 無彩色点補正を加えた色相差の色相角依存性

5. 3 CIELAB 色相スケールの補正関数 $F(H)$ の導出

マンセル表色系の明度及び彩度の等しい隣接する色のメトリック色相差 ($\Delta H^*/C^*$) は、マンセル表色系が内包する知覚的な不均等性の影響を受けていることが推定されるが、クロマスケールの補正関数 $F(C)$ を導出した際の図 4.2 のクロマ差の変化と同様に、メトリック色相角の変化によって連続的で滑らかな変化をしている。補正関数 $F(C)$ と同じ理由から、式(5-1)に示す余弦関数を用いた多項式によって近似することができる。項の数を増減させながら、最小二乗法によって係数 a_i 及び θ_i を推定する。

$$F(H) = a_0 + a_1 \cos(h + \theta_1) + a_2 \cos(2h + \theta_2) + a_3 \cos(3h + \theta_3) + a_4 \cos(4h + \theta_4) + a_5 \cos(4h + \theta_5) \quad (5-1)$$

式(5-1)の係数を推定する際に、4.3節で述べた無彩色点の偏心を補正しないデータ、色相環に欠落が生じない各彩度の等彩度(クロマ)線の中心点の軌跡から推定した無彩色点を用いて補正したデータ(無彩色補正方法I)及び彩度 $C=2$ の等彩度(クロマ)線の中心点から無彩色点を補正したデータ(無彩色点補正方法II)を用いた。各データから推定された $a_0 \sim a_5$ 及び $\theta_1 \sim \theta_5$ までの値を表5.1～表5.3に示す。また、式(5-1)から予測されるメトリック色相差($\Delta H^*/C^*$)の色相角依存性の推定結果を図5.2に示す。

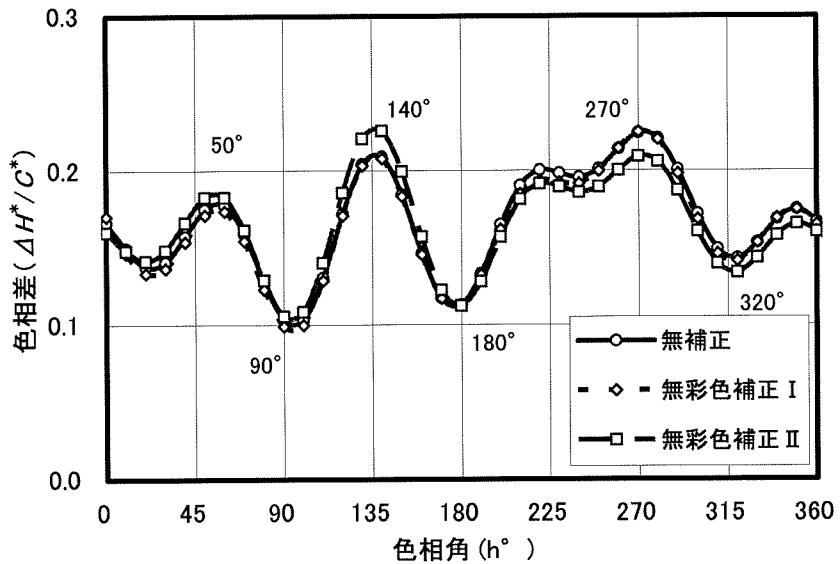


図5.2 色相差補正関数 $F(H)$ による色相角依存性の推定結果

図5.2から、無彩色点の偏心の補正方法による違いは顕著でなく、無彩色点補正方法IIの結果が色相角約50°と色相角140°の(赤一緑)軸方向で大きく、色相角約270°で小さくなる傾向がわずかに見られる程度である。

表5.1～表5.3によるメトリック色相差($\Delta H^*/C^*$)の色相角による推定値の最小値は約0.099、最大値は約0.226になっている。この結果は、色相差 $\Delta H=2.5$ のメトリック色相差に、メトリック色相角によって2倍以上の差が生じることになり、CIELABの色相スケールの不均等性が大きいことを示している。メトリック色相角によるメトリック色相差($\Delta H^*/C^*$)の大小と色相環における色相の関係を見ると、メトリック色相角約50°とメトリック色相角約180°、メトリック

ク色相角約 90° とメトリック色相角約 270° 及びメトリック色相角約 140° とメトリック色相角約 320° で大小が対になるように変化している。このメトリック色相角の対は、マンセル表色系では、2.5YR-5BG、5Y-5PB 及び 10GY-10P に対応する。ややズレのある 2.5YR と 5BG を除いてマンセル表色系の色相環上で、ほぼ対向するような補色の関係に位置している。色相環上で直交する 2 又は 3 軸を中心に、局所的な色相差の圧縮・拡大が生じていることが推定される。反対色（赤-緑及び黄-青）が直交するような色座標を採用している CIELAB と 5 つの基本色相を色相環上に配置したマンセル表色系の色相分割の相違に起因する変動であることが考えられる。

補正関数 $F(H)$ の効果を数量的に検討するために、補正関数 $F(H)$ を適用して補正したメトリック色相差 ($\Delta H^*/C^*$) とメトリック色相角との関係を図 5.3～図 5.5 に示す。図 5.3 は無彩色点の偏心を補正しない結果である。図 5.4 は無彩色点補正方法 I によって無彩色点を補正した結果であり、図 5.5 は無彩色点補正方法 II によって無彩色点を補正した結果である。

表 5.1 無彩色点を補正しないデータから推定した $F(H)$ の係数 a_i

a_0	a_1	θ_1	a_2	θ_2	a_3	θ_3
0.16619	-0.024548	-80	-0.012483	15	0.020863	-57
—	a_7	θ_4	a_9	θ_5		
—	-0.015206	-21	0.027015	47		

表 5.2 無彩色点補正方法 I によって補正したデータから推定した $F(H)$ の係数 a_i

a_0	a_1	θ_1	a_2	θ_2	a_3	θ_3
0.16547	-0.021946	276	-0.011843	3	0.020905	-71
—	a_4	θ_4	a_5	θ_5		
—	-0.015912	-40	0.027277	26		

表 5.3 無彩色点補正方法 II によって補正したデータから推定した $F(H)$ の係数 a_i

a_0	a_1	θ_1	a_2	θ_2	a_3	θ_3
0.16458	-0.014152	-59	-0.010610	7	0.024567	-59
—	a_4	θ_4	a_5	θ_5		
—	-0.018464	-16	0.026083	45		

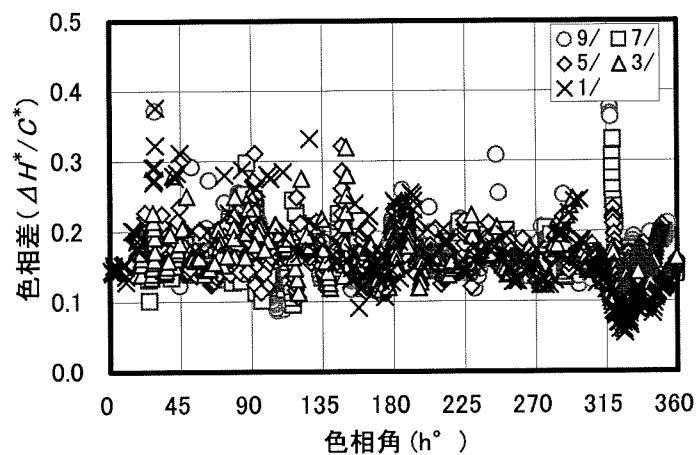


図 5.3 修正クロマスケールを用いたメトリック色相差の補正関数 $F(H)$ による色相角依存性の補正結果

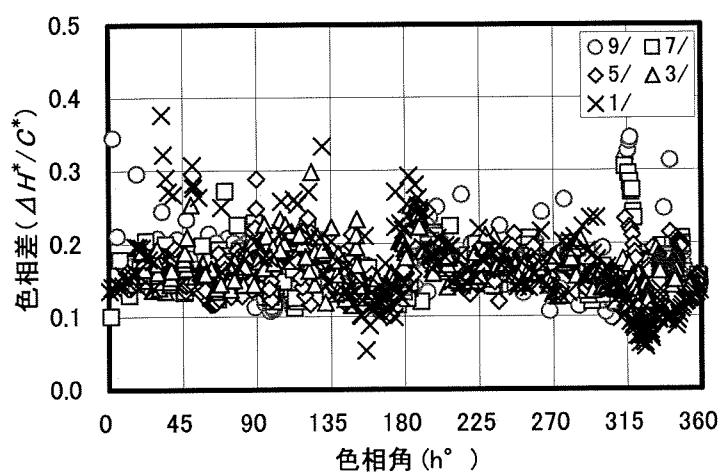


図 5.4 無彩色点補正方法 I を適用した修正クロマスケールを用いたメトリック色相差の補正関数 $F(H)$ による色相角依存性の補正結果

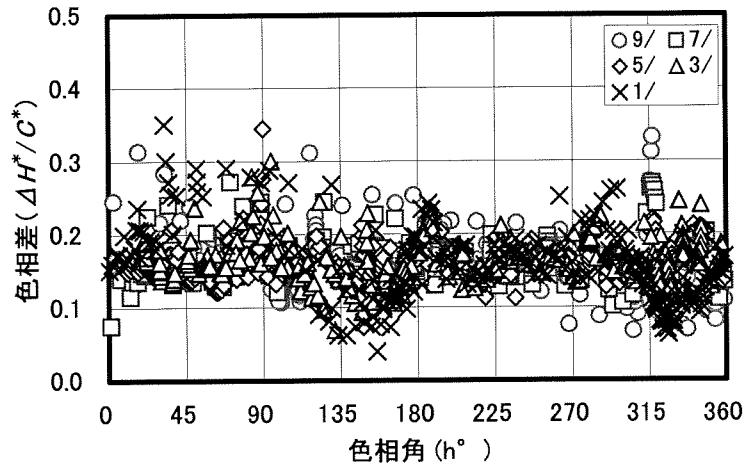


図 5.5 無彩色点補正方法Ⅱを適用した修正クロマスケールを用いた
メトリック色相差の補正関数 $F(H)$ による色相角依存性の補正結果

図 5.3～図 5.5 の結果は、図 5.1 と比較して、明らかな色相角依存性は見られず、補正関数 $F(H)$ の効果が確認される。しかし、図中の×印や○印で示されるように明度及び彩度が異なった場合の分散が大きく、 $\Delta H^*/C^*$ の値が一定値とはいえない。その程度を、各明度別の平均値並びに分散の大きさとして表 5.4 に示す。

表 5.4 には、CIELAB、修正クロマスケール、無彩色点補正及び色相スケールの補正を適用した計算結果を比較できるようにまとめて示した。表 5.4 の AVE は平均値、STD は標準偏差である。表 5.4 から、なんらかの方法で無彩色点の偏心を補正したデータに、 $F(H)$ を組み合わせた結果から得られる標準偏差 (STD) は、CIELAB 及び修正クロマスケールのみの結果と比較して小さい値が得られている。分散の大きさを比較するために、平均値との比 (STD/AVE) を計算して図に示すと図 5.6 になる。図 5.6 の計算方法の番号は、表 5.4 の左の列から順に、1 は CIELAB、2 は無彩色点補正を行わない修正クロマスケール、3 は 2 に無彩色点補正方法 I を追加した方法、4 は 3 に色相差の補正関数 $F(H)$ を追加した方法である。また、5 は 2 に無彩色点補正方法 II を追加した方法、6 は 5 に色相差の補正関数 $F(H)$ を追加した方法である。

無彩色点補正方法Ⅱを用いた修正クロマスケールに色相差補正関数 $F(H)$ を組

み合わせた結果が最も小さく、CIELABと比較して、マンセル表色系の色相知覚により相關した色相差になっている。

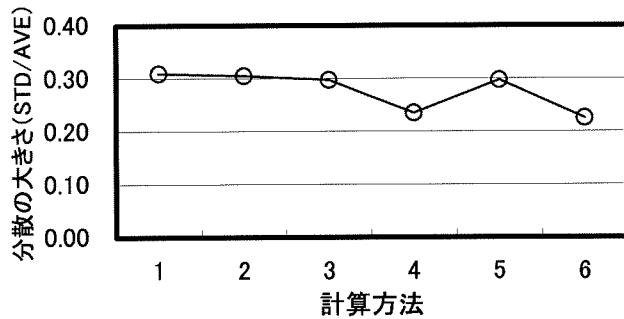


図 5.6 メトリック色相差 ($\Delta H^*/C^*$) の分散の大きさの比較

表 5.4 修正クロマスケール及び色相差補正を適用した場合のメトリック色相差 $\Delta H^*/C^*$ の変動

		未補正 (CIELAB)	クロマ補正のみ	無彩色補正及び色相補正			
				無彩色補正 I		無彩色補正 II	
				無彩色補正のみ	無彩色+色相補正	無彩色補正のみ	無彩色+色相補正
V=9	AVE	0.163	0.155	0.154	0.167	0.153	0.163
	STD	0.062	0.058	0.053	0.045	0.052	0.043
V=7	AVE	0.160	0.155	0.156	0.164	0.156	0.163
	STD	0.044	0.043	0.043	0.033	0.042	0.030
V=5	AVE	0.164	0.160	0.160	0.165	0.160	0.165
	STD	0.045	0.044	0.044	0.032	0.043	0.030
V=3	AVE	0.162	0.160	0.160	0.165	0	0.165
	STD	0.045	0.043	0.042	0.033	0.043	0.033
V=1	AVE	0.156	0.156	0.155	0.158	0.154	0.158
	STD	0.061	0.059	0.058	0.058	0.060	0.055
TOTAL		0.162	0.158	0.157	0.164	0.157	0.163
		0.050	0.048	0.047	0.039	0.047	0.037

メトリック色相差 ΔH^* は、円筒座標系であるマンセル表色系の性質から、メトリッククロマ C^* の値に比例して大きくなる。 $F(H)$ の効果を、 $\Delta H^*/C^*$ の値ではなく、メトリック色相差 ΔH^* とメトリッククロマ C^* との関係で示すと図 5.7～図 5.10 のようになる。図 5.7 は CIELAB の結果を、図 5.8 は修正クロマスケールによるクロマ補正だけを行った結果を、図 5.9 は図 5.8 の結果に無彩色点補正方法 I 及び $F(H)$ を適用した結果を示す。また、図 5.10 は図 5.8 の結果に無彩色点補正方法 II 及び $F(H)$ を適用した結果である。各図中には、切片が零になるように推定した回帰式及び決定係数 (R^2) を示している。図 5.6 と図 5.9 との比較か

ら、無彩色点補正方法Ⅱに $F(H)$ を適用した結果は、CIELAB から得られる結果に比して良好な相関関係（相関係数 $r=0.956$ ）になっている。ただし、色相環が欠落する領域に見られるマンセル表色系の歪みや、明度 1 の色相による変化が他の明度と若干異なることによる影響から、図 5.5 のようにメトリック色相差 ($\Delta H^*/C^*$) の値はかならずしも一定値にはなっていない。しかし、図 5.10 を含めた回帰分析の結果からは、 $F(H)$ による補正効果が有効に働いていることが認められる。補正関数による補正の簡便性を優先して、色相スケールの改良には、明度ごとに異なった $F(H)$ を採用することをせずに表 5.1～表 5.3 の何れかの係数を用いることにする。

マンセル表色系の色相知覚に、より相關した色相スケールという観点では、無彩色点補正方法Ⅱを採用することが望ましいが、近似した 2 色の色差を問題とする均等色差空間として見た場合に、無彩色点の補正による効果がどのように影響するかについては、更に検討が必要と考えられる。この点については、次章の産業応用と性能比較の結果を踏まえて、検討することにする。

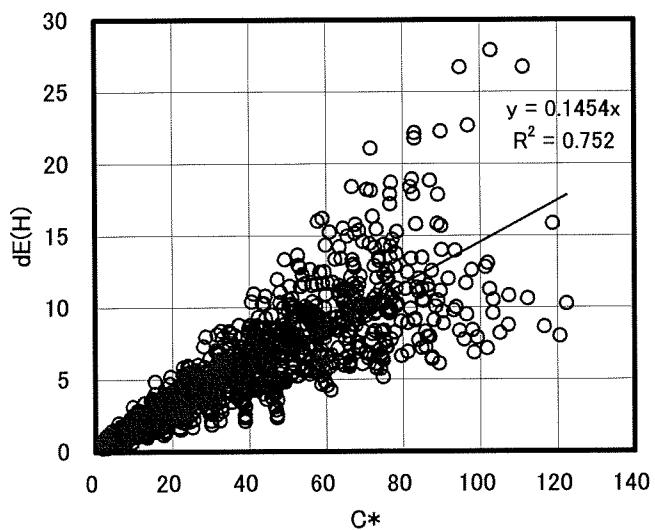


図 5.7 CIELAB のメトリック色相差とメトリッククロマの関係

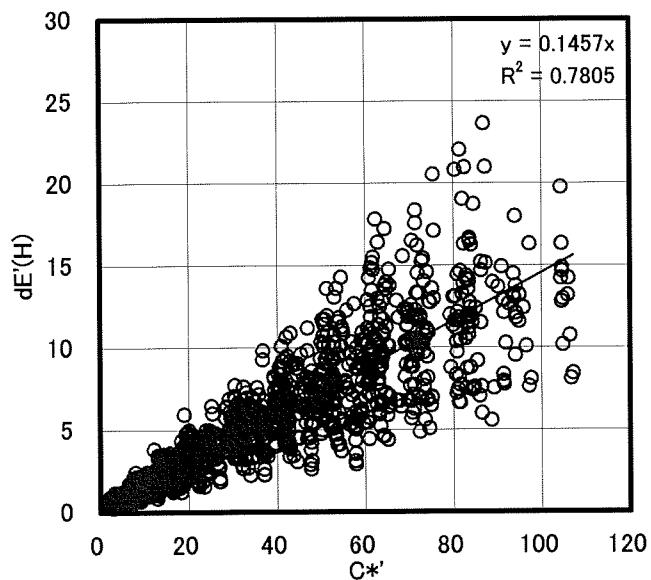


図 5.8 修正クロマスケールを用いたメトリック色相差とメトリッククロマの関係

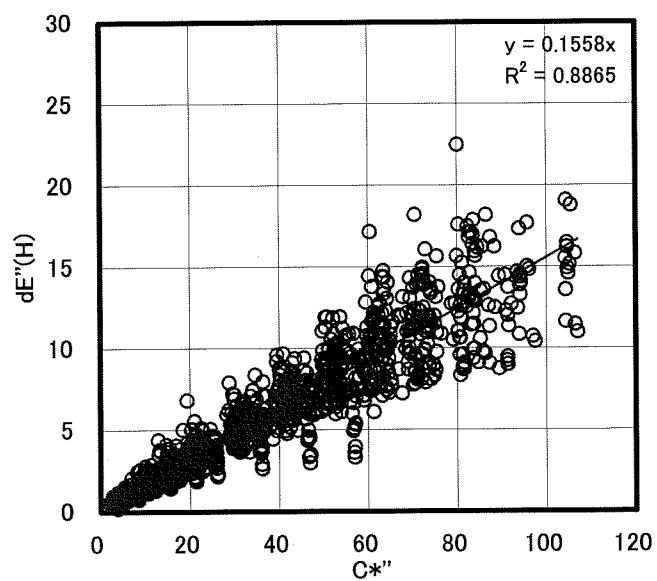


図 5.9 修正クロマスケールに無彩色点補正 I 及び色相差の補正関数 $F(H)$ を適用したメトリック色相差とメトリッククロマの関係

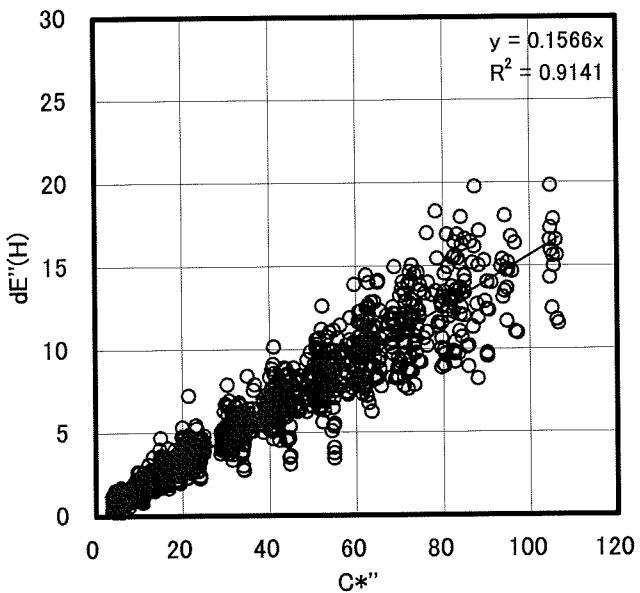


図 5.10 修正クロマスケールに無彩色点補正Ⅱ及び色相差の補正関数 $F(H)$ を適用したメトリック色相差とメトリッククロマの関係

5.4 結論

マンセル表色系の色票の三刺激値に、式(4・1)の補正関数 $F(C)$ によるクロマスケールの補正を行い、隣接するメトリック色相差を計算した結果、色相によって、メトリック色相差が連続的で滑らかな変化をすることを示した。この変化をクロマスケールの検討において導出した補正関数 $F(C)$ と同様に、余弦関数による近似を行い、色相差の補正関数 $F(H)$ を求めた。修正クロマスケールを用いてマンセル表色系の彩度の等歩度性にに関するようにした色空間で、色相差補正関数 $F(H)$ を用いてメトリック色相差を計算した。マンセル表色系で隣接する色の色相差の相關量であるメトリック色相差は色座標の位置に関係なく同じ値になることが期待されるので、計算されたメトリック色相差の分散の大きさを比較した。その結果、無彩色点補正方法Ⅱを用いた修正クロマスケールと色相差の補正関数 $F(H)$ を組み合わせて計算した色相スケールが、マンセル表色系の色相差の相關量として優れていることを明らかにした。修正クロマスケールと色相差の補正関数 $F(H)$ を組み合わせて計算される色差は、マンセル表色系の等歩度性を基本とした色差の均等性を与えることから、均等色差空間ということができる。

第6章 均等色差空間と色差式

6. 1 序論

第4章及び第5章において、均等色知覚空間の一つであるマンセル表色系に対して、より良い相関量が得られるように、CIELABのクロマスケール及び色相スケールの色相角による変化に着目した検討を行った。CIELABに補正関数 $F(C)$ 及び $F(H)$ を適用して得られる色差は、マンセル表色系の色知覚の等差性をより良く予測するもので、色知覚に基づいた色差の均等性を与えるという観点から、均等色空間というより均等色差空間と呼ぶべきものである。マンセル表色系における等差性は、色相、明度及び彩度の各属性内における視感実験によって検討が行われ、その結果から、基準値が規定¹⁾されている。しかし、マンセル表色系を用いた色差表示の検討では、例えば、明度 1 step ($\Delta V=1.0$) の差に対して彩度 2 step ($\Delta C=2.0$) 及び色相 3 step ($\Delta H=3.0$) の差が等しい色差知覚を与えることが報告²⁾されている。これは、マンセル表色系が属性間の等差性を含めた均等色差空間ではないことを示唆している。従って、CIELABに補正関数 $F(C)$ 及び $F(H)$ を適用して得られる均等色差空間における 2 色の間の色差を予測するためには、メトリック明度差、メトリッククロマ差及びメトリック色相差に適当な重み付けを導入した色差式の開発が必要となる。本章では、均等色差空間を用いて 2 色の色差を予測する方法について検討を行った。

6. 2 メトリック色相差 ($\Delta H^{*'}\right)$ とクロマの関係

CIELAB の明度指数 (L^*) 及び補正関数 $F(C)$ の性質から、マンセル表色系の $\Delta V=1.0$ 及び $\Delta C=2.0$ の色差は L^* 及び色相・クロマに關係なくほぼ一定値 $\Delta L^*\approx 10$ 並びに $\Delta C^{*'}\approx 10$ になる。しかし、メトリック色相差 ($\Delta H^{*'}\right)$ については図 5.7～図 5.9 に示すように、マンセル表色系の $\Delta H=2.5$ の色差はクロマ ($C^{*'}\right)$ に依存して変化している。図 5.8 及び図 5.9 の無彩色点を補正したメトリック色相差 ($\Delta H^{*'}\right)$ とクロマ ($C^{*'}\right)$ の関係は零点を切片とする直線回帰式で近似でき、その傾きは $b\approx 0.156\sim 0.157$ と概ね一致している。図 5.9 の回帰式から、 $\Delta V=1.0$ 及び $\Delta C=2.0$ の色差に等しい色差 ($\Delta H^{*'}=10$) になるクロマ ($C^{*'}\right)$ の値は $C^{*'}=63.7$ に相当する。この $C^{*'}\right)$ では、マンセル表色系の $\Delta H=2.5$ step の差は、 $\Delta V=1.0$ 及び $\Delta C=2.0$ の差である $\Delta L^*\approx 10$ 並びに $\Delta C^{*'}\approx 10$ に概ね等しくなる。このことから、クロマによって変化するメトリック色相差 ($\Delta H^{*'}\right)$ とメトリック明度差 ($\Delta L^*\right)$ 及びクロマ差 ($\Delta C^{*'}\right)$ との、色差属性間の重み付けを検討する際の色相差の規準とすることが適當と考えられる。無彩色点補正を加えて補正関数 $F(H)$ を用

いて得られるメトリック色相差 (ΔH^*) を、式(6-1)の関数によって規準化したクロマ依存性を考慮したメトリック色相差 (ΔH^*) を用いて色差式の検討を行うことにする。ただし、 C^* の値は $C^*=63.7$ ではなく、端数を丸めて $C^*=65$ を用いた。また、定数項の 1 は、 $C^*\neq 0$ のときの異常値を避けるために用いた。

$$\begin{aligned} k(H) &= 1 + (1/65) \times C^* \\ &= 1 + 0.0154 \times C^* \end{aligned} \quad (6-1)$$

同様に、無彩色点補正をしない場合には、図 5.7 の関係から式(6-2)を適用することができる。

$$\begin{aligned} k(H) &= 1 + (1/70) \times C^* \\ &= 1 + 0.0143 \times C^* \end{aligned} \quad (6-2)$$

6. 3 色差属性と色差知覚との関係

マンセル表色系で用いられている色相、明度及び彩度と同様に、色差においても色相差、明度差及び彩度差が知覚される。このような色差における違いを色差属性と呼んでいる。

D.Nickerson²⁾らの研究から、マンセル表色系における色相、明度及び彩度の各 1 step 差の色差知覚は等しく感じられないことが明らかになっている。このため、マンセル表色系の色相差、明度差及び彩度差との良い相関量が得られるよう改変した均等色差空間におけるメトリック明度差 (ΔL^*)、メトリッククロマ差 (ΔC^*) 及びメトリック色相差 (ΔH^*) で定義される色差属性の間にも、色差知覚との不一致が生じる。また、産業界における製品では、例えば、マンセル表色系における彩度の 1 step に相当する色差 $\Delta C^*=5$ の 1/5 以下程度の微小色差が問題になることが多い。マンセル表色系のように大きな色差知覚を対象にしている均等色差空間を、産業応用としての色差式に用いることができるかどうかも、問題となる。このため、CIE が 1978 年に提案した色差研究のためのガイドライン³⁴⁾に示された 4 種類の物体色（色票）を用いて各色差属性と色差知覚の関係について検討を行った。

色差の心理物理的な尺度は、零点を有する比率尺度と考えることができるので、色差属性が異なる 2 色の対から知覚される色差を比率評定法によって評価する。表 6.1～表 6.4 及び図 6.1 に評価に用いた色票の測定値及び CIELAB の色座標の値を示す。図 6.1 には基準の色に対して色相及びクロマを変化させたときの色座標を示した。また、評価に用いた色票（色差対）の配置を図 6.2 に示す。

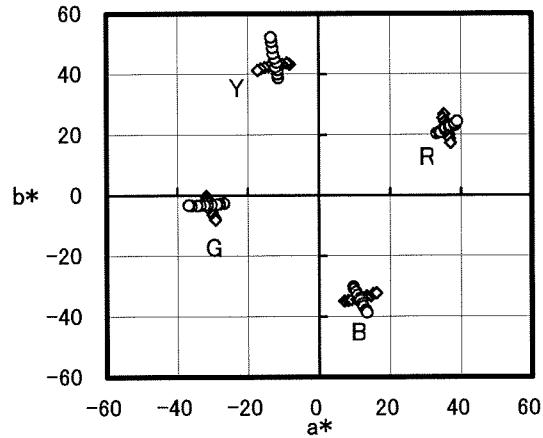


図 6.1 色差属性と色差知覚との比較に用いた色票の色座標

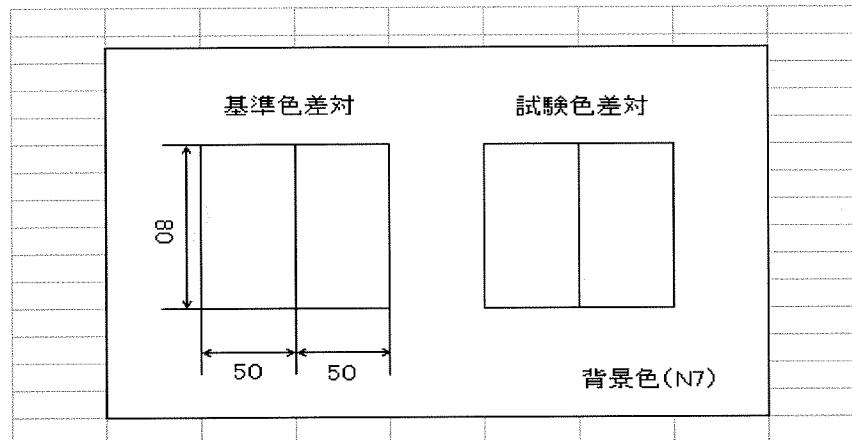


図 6.2 色票（色差対）の配置図

図 6.2 の基準色差対は、表 6.5 に示すようにほぼメトリック明度差だけから構成される色差対で、その知覚される色差（知覚色差）の大きさを 1.0 として、試験色差対の知覚される色差を、比率（表 6.1～表 6.4 の V 列の値）で回答するときの参照として用いる。例えば、基準色差対と比較して、試験色差対の知覚色差が 2 倍に見える場合には、V=2.0 になる。

表 6.5 色差知覚の比率評定に用いた基準色差対

色	V	L*(S)	a*(S)	b*(S)	L*(T)	a*(T)	B*(T)	dL*	dC*	dH*	dE*
R	1.0	52.32	35.99	22.09	51.10	36.21	22.12	-1.22	0.20	-0.09	1.24
Y	1.0	83.57	-12.10	43.30	84.80	-12.14	43.31	1.23	0.02	0.04	1.23
G	1.0	54.89	-31.40	-3.25	53.83	-31.33	-3.28	-1.06	-0.07	0.04	1.06
B	1.0	34.08	11.52	-34.03	34.97	11.47	-34.14	0.89	0.09	-0.08	0.90

知覚色差の評価及び解析の手順を以下に示す。

- (1) 評価者は、約 1,000lx の北窓昼光下で、図 6.2 の背景色に順応する。
- (2) 評価者は、基準色差対及び試験色差対から知覚される色差を比較し、基準色差対の大きさを基準とした試験色差対の色差の比率を直接評定する。
- (3) 評価者 4 名の評定比率を、尺度値 (V) とする。
- (4) 尺度値 (V) と表 6.5 に示す基準色差対の色差の積を計算し、知覚色差とする。
- (5) 知覚色差と表 6.1～表 6.4 の試験色差対の色差値から、回帰分析によって各色差属性と色差知覚の関係について検討する。

比率評定法による尺度値を表 6.1～表 6.4 の「V」列に示す。なお、被験者間の尺度値の相関性は、相関係数で $r = 0.8 \sim 0.9$ であり、有意な一致性が認められた。

基準色差対の色差から予測した知覚色差と測定によって得られる試験色差対の色差（以下、測色色差という。）との関係を図 6.3～図 6.7 に示す。図 6.3～6.7 には、零点を切片とする回帰式及び相関係数を併記した。 $y(V)$ 、 $y(C)$ 及び $y(H)$ は、メトリック明度差 (ΔL^*)、メトリッククロマ差 ($\Delta C^{*'}_*$) 及びメトリック色相差 ($\Delta H^{*''}$) についての回帰式を示す。図 6.4 は CIELAB の結果を、図 6.5 は無彩色点補正をしないで補正関数 $F(C)$ を適用した修正クロマスケールと色相スケールの補正関数 $F(H)$ を適用した結果（以下、この色差式を New Color-Difference Formula、略称 NCDF という。）を示す。また、図 6.6 及び図 6.7 は図 6.5 に無彩色点補正方法 I（以下、NCDF-1 という。）及び無彩色点補正方法 II（以下、NCDF-2 という。）を適用した結果である。図 6.3 は図 6.4～図 6.7 の結果をまとめたものである。

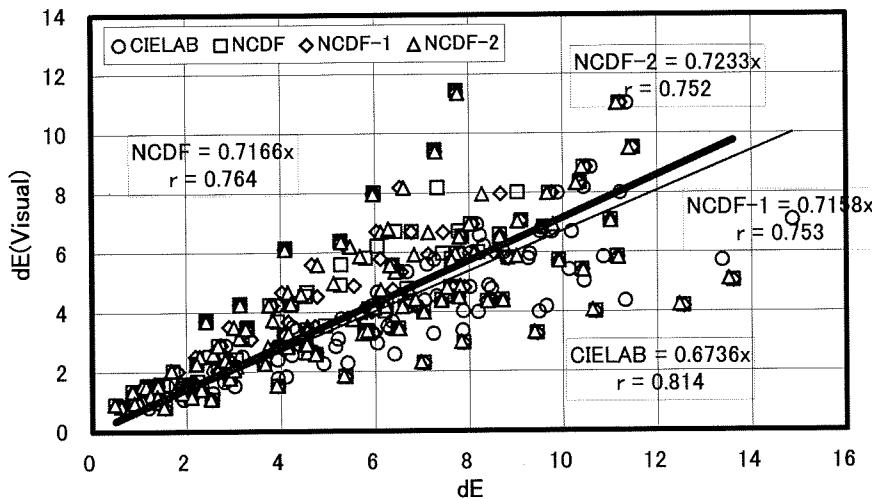


図 6.3 知覚色差と測色色差の関係

図 6.3 から、比率評定を行った全試験色差対に対する知覚色差と CIELAB、NCDF、NCDF-1 及び NCDF-2 から得られる測色色差の間には、線形な相関関係が認められる。しかし、図 6.4～図 6.7 の結果から、色差属性によって回帰式の傾きが異なり、測色色差が同じであっても知覚色差に違いが生じていることがわかる。基準色差対として表 6.5 に示すように、ほぼメトリック明度差だけで構成される色差対を使用していることから、ほぼメトリック明度差だけで構成される試験色差対では、回帰式の傾きが $b=1.0$ になることが期待される。しかし、評価結果は約 $b=0.9$ と知覚色差がやや小さくなる傾向を示している。この理由として、基準色差対に対して試料色差対の知覚される色差の比率 V が、 $V=1 \sim 10$ にわたり、比率の幅が広すぎることによって、直線性が若干低下したことが考えられる。一般に、比率評定の直線性は $V=1 \sim 5$ の範囲と言われている。しかし、回帰分析から知覚色差と測色色差の関係を、線形回帰式で表すことができるよう、尺度の直線性の崩れによる影響は少なく、得られた比率尺度には十分な信頼性があると考えられる。

CIELAB と NCDF、NCDF-1 及び NCDF-2 の結果を比較すると、やや CIELAB の相関係数が高い結果になっている。この理由は、尺度値 (V) と表 6.5 に示す基準色差対の色差から計算した知覚色差は、4 つの色差式でほぼ等しい値になる。しかし、補正関数 $F(H)$ 及び $F(C)$ 、式(6-1)及び式(6-2)を用いて補正を加えて得ら

れる測色色差は、補正効果によって、CIELABの測色色差に比較して小さくなる。このため、回帰からの分散が大きくなつたことに起因している。実際に、測色色差のスケール（横軸のスケール）を合わせるようにして比較すると、相関係数は概ね一致する。特定の色差属性だけが異なる色差対では、補正による影響は、主として、スケール効果として働いていることがわかる。

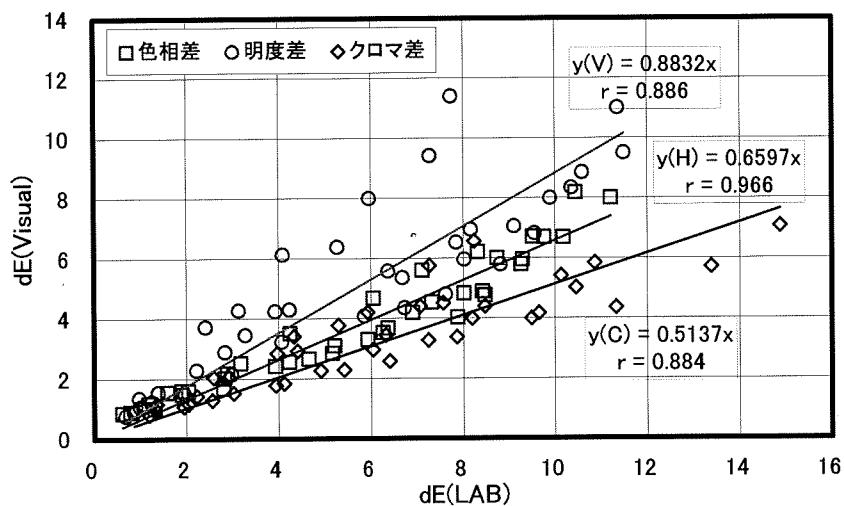


図 6.4 知覚色差と CIELAB 色差値の関係

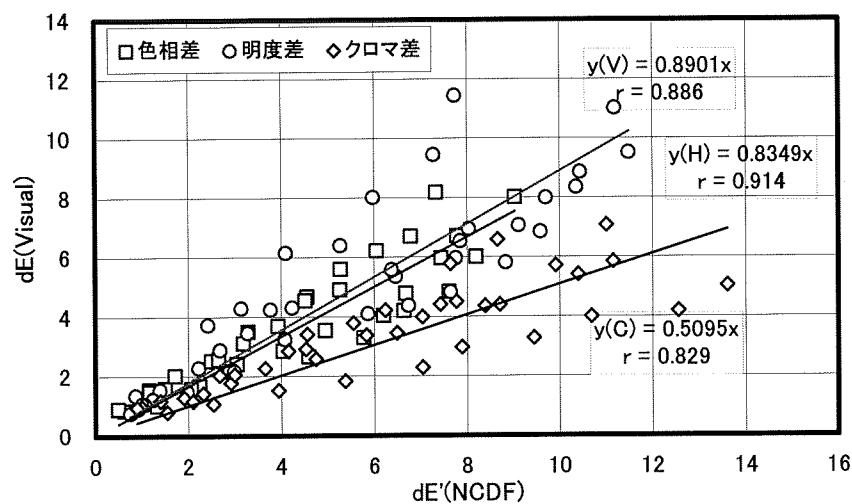


図 6.5 知覚色差と NCDF 色差値の関係

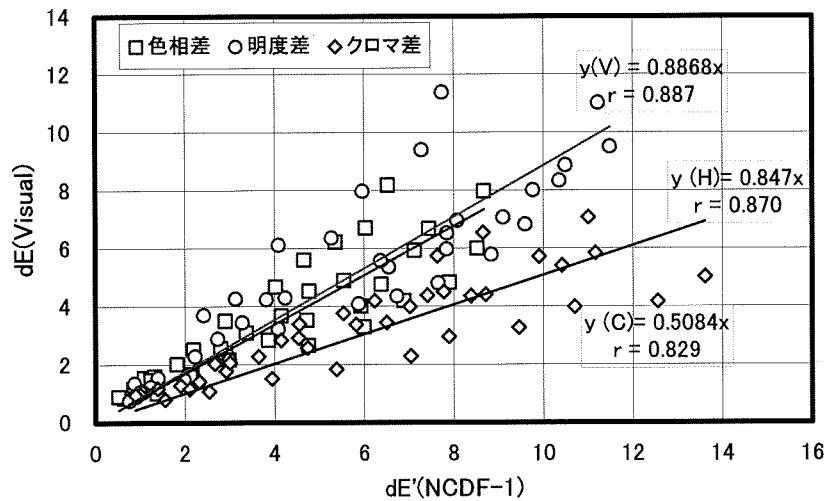


図 6.6 知覚色差と NCDF-1 色差値の関係

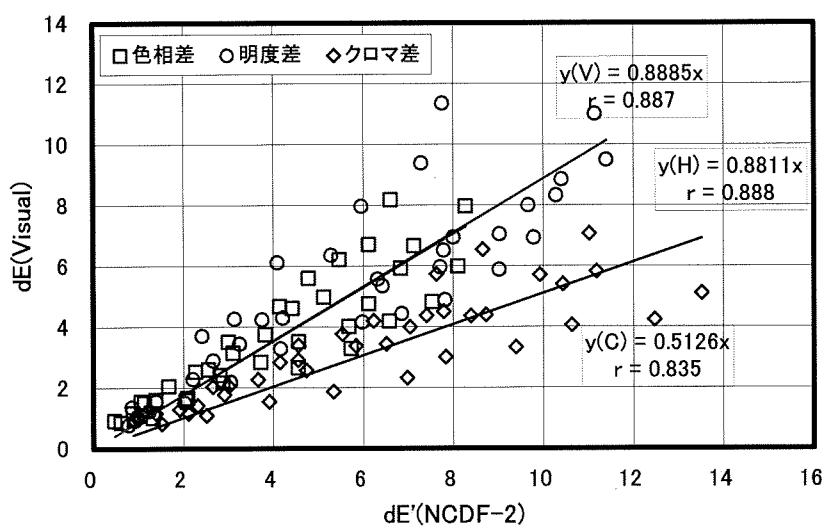


図 6.7 知覚色差と NCDF-2 色差値の関係

図 6.4～図 6.7 の回帰式の傾きを比較すると、メトリック明度差 (ΔL^*) の傾きに対して、メトリッククロマ差 (ΔC^*) の傾きの比率は約 0.57～0.58 になっている。この傾向は、色差式による差違は見られない。また、メトリック色相差

($\Delta H^{*''}$)は、CIELAB の傾き b が約 0.75 に対して NCDF、NCDF-1 及び NCDF-2 の傾き b は約 0.94~0.99 になっている。メトリッククロマ差 ($\Delta C^{*''}$) が他の色差属性に比較して大きく計算されていることを示している。D.Nickerson²⁾らの研究では、マンセル表色系の彩度差 (ΔC) の色差知覚も、色相差と同様に色差対を構成している色の彩度に依存することを指摘している。特定の彩度におけるマンセル表色系の色相、明度及び彩度の各 1 step 差に対応する色差知覚を等しくするために、色相差及び彩度差の重み付け係数を提案している。一方、R.McDonald³⁾は、繊維製品の色合わせにおける合否判定の結果から、製品として許容できるメトリッククロマ差 (ΔC^*) が色差対の色のクロマ (C^*) に依存して大きくなることを報告している。R.McDonald の結果によれば、図 6.1 の 4 種類の物体色（色票）の平均クロマ (C^*) である $C^* \approx 38$ 以下のクロマでは回帰式の傾きは大きく、 $C^* = \text{約 } 38$ 以上では小さくなっている。また、 $C^* \approx 38$ での知覚色差と測色色差の比率は約 1:2 になることから、クロマ (C^*) に比例して傾きが変化すると仮定すると、クロマ差 (ΔC^*) の知覚色差は式(6-3)のように傾き b を持つ、クロマの関数として考えることができる。式(6-3)では、 $C^* \approx 38$ ではなく端数を丸めた $C^* = 40$ を用いた。

$$b = (2/40) \times C^* = 0.05 \times C^* \quad (6-3)$$

評価に用いた試験色差対の色差は、基準色差対の色差を基準にして計算した知覚色差で、最大でほぼ $\Delta E(V)=10$ に相当する。この値は式 (6-1) 及び (6-2) で基準とした均等色差空間におけるマンセル表色系の $\Delta H=2.5$ step、 $\Delta V=1.0$ 及び $\Delta C=2.0$ の差に相当する。図 6.1 の 4 種類の物体色（色票）を用いて、各色差属性と知覚色差の関係について検討を行った結果は、丁度、均等色差空間におけるマンセル表色系の隣接する色票の間の知覚色差の評価に対応する。この結果と前章までの解析結果と合わせると、産業界において問題としている微小色差から、マンセル表色系が対象としている比較的大きな色差までを連続的に扱うことができるということを示唆している。また、式(6-1)又は式(6-2)を用いてメトリック色相差 ($\Delta H^{*''}$) を規準化することによって、図 6.5~図 6.7 に示すようにメトリック明度差 (ΔL^*) 及びメトリック色相差 ($\Delta H^{*''}$) と知覚色差の関係は、ほぼ等しい回帰式で表すことができる。

これらのことから、均等色差空間における色差を計算する際に、CIE94、CIEDE2000 及び M-LAB⁴⁾と同様に、色差属性に適当な重み付けを導入することによって、色差対を構成している色差属性に關係なく適用できる色差式を開発できることと考えられる。

表 6.1 色差属性と色差知覚との比較に用いた色票の色座標（赤系）

Color	組合	V	L*(S)	a*(S)	b*(S)	C*ab	H*ab	L*(T)	a*(T)	b*(T)	C*ab	H*ab	dL*	dC*	dH*	dE
R(H)	1-2	1.25	47.05	34.56	28.30	44.67	39.31	47.09	35.11	26.80	44.17	37.36	0.04	-0.50	-1.52	1.60
	1-3	1.35	47.05	34.56	28.30	44.67	39.31	46.71	34.88	25.53	43.22	36.20	-0.34	-1.44	-2.39	2.81
	1-4	1.95	47.05	34.56	28.30	44.67	39.31	46.79	35.35	24.45	42.98	34.67	-0.26	-1.69	-3.55	3.94
	1-5	2.30	47.05	34.56	28.30	44.67	39.31	46.62	35.59	23.25	42.51	33.16	-0.43	-2.16	-4.68	5.17
	1-6	2.85	47.05	34.56	28.30	44.67	39.31	46.95	35.73	22.14	42.03	31.78	-0.10	-2.64	-5.69	6.27
	1-7	3.25	47.05	34.56	28.30	44.67	39.31	46.72	36.35	20.63	41.80	29.58	-0.33	-2.87	-7.33	7.88
	1-8	3.85	47.05	34.56	28.30	44.67	39.31	46.86	36.56	20.06	41.70	28.75	-0.19	-2.97	-7.94	8.48
	1-9	4.80	47.05	34.56	28.30	44.67	39.31	46.58	36.45	19.21	41.20	27.79	-0.47	-3.47	-8.61	9.30
	1-10	5.40	47.05	34.56	28.30	44.67	39.31	46.85	36.76	18.79	41.28	27.07	-0.20	-3.38	-9.16	9.76
	1-11	6.45	47.05	34.56	28.30	44.67	39.31	46.93	37.07	17.37	40.94	25.11	-0.12	-3.73	-10.58	11.22
R(V)	9-8	1.25	50.04	36.33	21.78	42.36	30.94	48.68	36.17	21.55	42.10	30.79	-1.36	-0.26	-0.12	1.39
	9-7	3.00	50.04	36.33	21.78	42.36	30.94	47.65	36.67	21.93	42.73	30.88	-2.39	0.37	-0.05	2.42
	9-6	3.45	50.04	36.33	21.78	42.36	30.94	46.95	36.73	22.14	42.89	31.08	-3.09	0.53	0.10	3.14
	9-5	4.95	50.04	36.33	21.78	42.36	30.94	46.00	36.90	22.16	43.04	30.99	-4.04	0.68	0.03	4.10
	9-4	5.15	50.04	36.33	21.78	42.36	30.94	44.77	36.26	21.98	42.40	31.22	-5.27	0.04	0.21	5.27
	9-3	6.45	50.04	36.33	21.78	42.36	30.94	44.20	37.28	22.54	43.56	31.16	-5.84	1.21	0.16	5.97
	9-2	7.60	50.04	36.33	21.78	42.36	30.94	42.76	36.23	21.67	42.22	30.88	-7.28	-0.14	-0.04	7.28
	9-1	9.20	50.04	36.33	21.78	42.36	30.94	42.31	35.96	21.79	42.05	31.21	-7.73	-0.31	0.20	7.74
R(C)	1-2	0.95	47.04	31.91	20.09	37.71	32.19	46.79	33.21	20.39	38.97	31.55	-0.25	1.26	-0.43	1.36
	1-3	1.15	47.04	31.91	20.09	37.71	32.19	46.86	34.00	20.84	39.88	31.51	-0.18	2.17	-0.47	2.23
	1-4	1.65	47.04	31.91	20.09	37.71	32.19	46.60	34.37	20.76	40.15	31.13	-0.44	2.45	-0.72	2.59
	1-5	2.30	47.04	31.91	20.09	37.71	32.19	46.88	35.62	21.50	41.61	31.11	-0.16	3.90	-0.75	3.97
	1-6	2.75	47.04	31.91	20.09	37.71	32.19	46.95	35.73	22.14	42.03	31.78	-0.09	4.33	-0.28	4.34
	1-7	3.05	47.04	31.91	20.09	37.71	32.19	46.45	36.75	22.15	42.91	31.08	-0.59	5.20	-0.78	5.29
	1-8	3.40	47.04	31.91	20.09	37.71	32.19	46.59	37.08	22.97	43.62	31.78	-0.45	5.91	-0.30	5.94
	1-9	3.55	47.04	31.91	20	37.71	32.19	46.56	38.27	23.12	44.71	31.14	-0.48	7.00	-0.76	7.06
	1-10	4.65	47.04	31.91	20.09	37.71	32.19	46.55	38.24	23.62	44.95	31.70	-0.49	7.24	-0.35	7.26
	1-11	5.30	47.04	31.91	20.09	37.71	32.19	46.86	38.92	24.41	45.94	32.10	-0.18	8.23	-0.07	8.24

表 6.2 色差属性と色差知覚との比較に用いた色票の色座標（黄系）

Color	組合	V	L*(S)	a*(S)	b*(S)	C*ab	H*ab	L*(T)	a*(T)	b*(T)	C*ab	H*ab	dL*	dH*	dC*	dE
Y(H)	1-2	0.95	84.76	-7.03	43.57	44.13	99.17	84.55	-8.16	43.30	44.06	100.67	-0.21	-0.07	1.16	1.18
	1-3	1.30	84.76	-7.03	43.57	44.13	99.17	84.84	-8.92	43.74	44.64	101.53	0.08	0.51	1.83	1.90
	1-4	2.05	84.76	-7.03	43.57	44.13	99.17	84.70	-10.20	43.28	44.47	103.26	-0.06	0.33	3.17	3.18
	1-5	2.85	84.76	-7.03	43.57	44.13	99.17	84.60	-11.27	43.24	44.68	104.61	-0.16	0.55	4.22	4.26
	1-6	-	84.76	-7.03	43.57	44.13	99.17	84.80	-12.14	43.31	44.98	105.66	0.04	0.85	5.05	5.12
	1-7	3.80	84.76	-7.03	43.57	44.13	99.17	84.91	-13.08	43.32	45.25	106.80	0.15	1.12	5.95	6.06
	1-8	4.55	84.76	-7.03	43.57	44.13	99.17	85.10	-14.07	42.59	44.85	108.28	0.34	0.72	7.07	7.12
	1-9	5.05	84.76	-7.03	43.57	44.13	99.17	85.07	-15.24	42.27	44.93	109.83	0.31	0.80	8.27	8.32
	1-10	5.45	84.76	-7.03	43.57	44.13	99.17	85.06	-16.38	41.81	44.90	111.39	0.30	0.77	9.48	9.52
	1-11	6.65	84.76	-7.03	43.57	44.13	99.17	85.34	-17.21	41.29	44.73	112.63	0.58	0.60	10.41	10.45
Y(V)	11-10	1.10	90.99	-12.21	45.84	47.44	104.92	90.29	-11.87	45.25	46.78	104.70	-0.70	-0.66	-0.18	0.98
	11-9	2.35	90.99	-12.21	45.84	47.44	104.92	88.50	-12.18	44.48	46.12	105.31	-2.49	-1.32	0.33	2.84
	11-8	3.45	90.99	-12.21	45.84	47.44	104.92	87.41	-11.84	44.27	45.83	104.97	-3.58	-1.61	0.05	3.93
	11-7	-	90.99	-12.21	45.84	47.44	104.92	86.35	-11.64	44.10	45.61	104.79	-4.64	-1.83	-0.10	4.99
	11-6	4.35	90.99	-12.21	45.84	47.44	104.92	84.80	-12.14	43.31	44.98	105.66	-6.19	-2.46	0.60	6.69
	11-5	4.85	90.99	-12.21	45.84	47.44	104.92	83.57	-11.70	42.83	44.40	105.28	-7.42	-3.04	0.29	8.02
	11-4	5.65	90.99	-12.21	45.84	47.44	104.92	83.11	-11.16	43.95	45.34	104.25	-7.88	-2.09	-0.54	8.17
	11-3	6.50	90.99	-12.21	45.84	47.44	104.92	81.51	-11.20	43.20	44.63	104.53	-9.48	-2.81	-0.31	9.89
	11-2	7.20	90.99	-12.21	45.84	47.44	104.92	80.73	-11.01	43.49	44.86	104.21	-10.26	-2.58	-0.57	10.59
	11-1	8.95	90.99	-12.21	45.84	47.44	104.92	80.00	-10.68	43.41	44.70	103.82	-10.99	-2.73	-0.88	11.36
Y(C)	1-2	0.80	85.31	-11.21	37.50	39.14	106.64	85.15	-11.40	38.81	40.45	106.37	-0.16	1.31	-0.19	1.33
	1-3	1.05	85.31	-11.21	37.50	39.14	106.64	85.03	-11.60	40.02	41.67	106.16	-0.28	2.53	-0.34	2.57
	1-4	1.45	85.31	-11.21	37.50	39.14	106.64	85.30	-11.57	41.43	43.02	105.60	-0.01	3.88	-0.74	3.95
	1-5	1.85	85.31	-11.21	37.50	39.14	106.64	84.81	-12.08	42.31	44.00	105.93	-0.50	4.86	-0.51	4.91
	1-6	2.10	85.31	-11.21	37.50	39.14	106.64	85.22	-11.84	43.88	45.45	105.10	-0.09	6.31	-1.14	6.41
	1-7	2.75	85.31	-11.21	37.50	39.14	106.64	84.85	-12.41	45.26	46.93	105.33	-0.46	7.79	-0.98	7.87
	1-8	3.25	85.31	-11.21	37.50	39.14	106.64	84.82	-12.81	46.84	48.56	105.30	-0.49	9.42	-1.03	9.49
	1-9	3.55	85.31	-11.21	37.50	39.14	106.64	84.91	-13.04	48.67	50.39	105.00	-0.40	11.25	-1.27	11.33
	1-10	4.65	85.31	-11.21	37.50	39.14	106.64	84.87	-13.30	50.71	52.43	104.70	-0.44	13.29	-1.54	13.38
	1-11	5.75	85.31	-11.21	37.50	39.14	106.64	84.98	-13.50	53.91	104.50	-0.33	14.77	-1.72	14.87	

表 6.3 色差属性と色差知覚との比較に用いた色票の色座標（緑系）

Color	組合	V	L*(S)	a*(S)	b*(S)	C*ab	H*ab	L*(T)	a*(T)	b*(T)	C*ab	H*ab	dL*	dC*	dH*	dE
G(H)	1-2	0.80	53.87	-31.63	0.36	31.63	179.35	53.80	-31.78	-0.23	31.78	180.41	-0.07	0.15	0.59	0.61
	1-3	0.95	53.87	-31.63	0.36	31.63	179.35	53.83	-31.59	-0.96	31.60	181.74	-0.04	-0.03	1.32	1.32
	1-4	1.50	53.87	-31.63	0.36	31.63	179.35	53.91	-31.55	-1.69	31.60	183.07	0.04	-0.04	2.05	2.05
	1-5	2.05	53.87	-31.63	0.36	31.63	179.35	54.01	-31.21	-2.50	31.31	184.58	0.14	-0.32	2.87	2.89
	1-6	-	53.87	-31.63	0.36	31.63	179.35	53.83	-31.33	-3.28	31.50	185.98	-0.04	-0.13	3.65	3.65
	1-7	2.50	53.87	-31.63	0.36	31.63	179.35	53.92	-30.93	-4.25	31.22	187.82	0.05	-0.41	4.64	4.66
	1-8	3.10	53.87	-31.63	0.36	31.63	179.35	53.87	-30.23	-5.41	30.71	190.15	0.00	-0.92	5.87	5.94
	1-9	3.95	53.87	-31.63	0.36	31.63	179.35	53.86	-29.95	-6.34	30.61	191.95	-0.01	-1.02	6.83	6.91
	1-10	4.55	53.87	-31.63	0.36	31.63	179.35	53.77	-29.38	-7.34	30.28	194.03	-0.10	-1.35	7.91	8.02
	1-11	5.65	53.87	-31.63	0.36	31.63	179.35	53.75	-29.22	-8.04	30.31	195.38	-0.12	-1.33	8.64	8.74
G(V)	1-2	1.00	59.09	-31.87	-2.89	32.00	185.18	58.12	-31.67	-2.98	31.81	185.38	-0.97	-0.19	0.11	0.99
	1-3	2.15	59.09	-31.87	-2.89	32.00	185.18	56.88	-31.70	-3.10	31.85	185.59	-2.21	-0.15	0.23	0.23
	1-4	3.25	59.09	-31.87	-2.89	32.00	185.18	55.86	-31.38	-3.17	31.54	185.77	-3.23	-0.46	0.33	0.38
	1-5	4.05	59.09	-31.87	-2.89	32.00	185.18	54.89	-31.40	-3.25	31.57	185.91	-4.20	-0.43	0.40	0.44
	1-6	-	59.09	-31.87	-2.89	32.00	185.18	53.83	-31.33	-3.28	31.50	185.98	-5.26	-0.50	0.44	0.50
	1-7	5.25	59.09	-31.87	-2.89	32.00	185.18	52.81	-30.89	-3.34	31.07	186.17	-6.28	-0.93	0.54	0.63
	1-8	6.15	59.09	-31.87	-2.89	32.00	185.18	51.35	-30.64	-3.37	30.82	186.28	-7.74	-1.18	0.60	0.75
	1-9	6.65	59.09	-31.87	-2.89	32.00	185.18	50.15	-30.21	-3.42	30.40	186.46	-8.94	-1.60	0.70	0.91
	1-10	7.85	59.09	-31.87	-2.89	32.00	185.18	48.88	-30.23	-3.46	30.43	186.53	-10.21	-1.57	0.73	1.03
	1-11	8.95	59.09	-31.87	-2.89	32.00	185.18	47.79	-29.87	-3.45	30.07	186.59	-11.30	-1.93	0.76	1.49
G(C)	1-2	0.90	54.41	-25.91	-2.49	26.03	185.49	54.32	-26.76	-2.62	26.89	185.59	-0.09	0.86	0.05	0.86
	1-3	1.10	54.41	-25.91	-2.49	26.03	185.49	54.20	-27.92	-2.83	28.06	185.79	-0.21	2.03	0.14	2.05
	1-4	1.95	54.41	-25.91	-2.49	26.03	185.49	54.15	-28.78	-2.95	28.93	185.85	-0.26	2.90	0.17	2.92
	1-5	2.75	54.41	-25.91	-2.49	26.03	185.49	54.05	-30.26	-3.16	30.42	185.96	-0.36	4.40	0.23	4.42
	1-6	-	54.41	-25.91	-2.49	26.03	185.49	53.83	-31.33	-3.28	31.50	185.98	-0.58	5.47	0.24	5.51
	1-7	3.25	54.41	-25.91	-2.49	26.03	185.49	54.00	-32.17	-3.28	32.34	185.82	-0.41	6.31	0.17	6.32
	1-8	4.25	54.41	-25.91	-2.49	26.03	185.49	53.97	-33.42	-3.32	33.58	185.67	-0.44	7.56	0.09	7.57
	1-9	4.15	54.41	-25.91	-2.49	26.03	185.49	53.98	-34.33	-3.34	34.49	185.56	-0.43	8.46	0.04	8.47
	1-10	5.10	54.41	-25.91	-2.49	26.03	185.49	53.83	-35.99	-3.34	36.14	185.30	-0.58	10.12	-0.10	10.13
	1-11	5.50	54.41	-25.91	-2.49	26.03	185.49	53.92	-36.73	-3.32	36.88	185.16	-0.49	10.85	-0.18	10.86

表 6.4 色差属性と色差知覚との比較に用いた色票の色座標（青系）

Color	組合	V	L*(S)	a*(S)	b*(S)	C*ab	H*ab	L*(T)	a*(T)	b*(T)	C*ab	H*ab	dL*	dC*	dH*	dE
B(H)	1-2	1.00	34.28	6.27	-34.93	35.49	280.18	34.13	7.04	-34.84	35.54	281.42	-0.15	0.06	0.77	0.79
	1-3	1.65	34.28	6.27	-34.93	35.49	280.18	34.17	8.17	-34.71	35.66	283.25	-0.11	0.17	1.91	1.92
	1-4	2.25	34.28	6.27	-34.93	35.49	280.18	34.11	9.06	-34.46	35.63	284.73	-0.17	0.14	2.83	2.83
	1-5	2.85	34.28	6.27	-34.93	35.49	280.18	33.89	10.47	-34.47	36.03	286.90	-0.39	0.54	4.19	4.24
	1-6	3.45	34.28	6.27	-34.93	35.49	280.18	34.19	11.38	-33.85	35.71	288.58	-0.09	0.22	5.22	5.22
	1-7	4.10	34.28	6.27	-34.93	35.49	280.18	34.21	12.53	-33.75	36.00	290.37	-0.07	0.51	6.35	6.37
	1-8	5.05	34.28	6.27	-34.93	35.49	280.18	34.62	13.36	-33.13	35.72	291.96	0.34	0.23	7.31	7.32
	1-9	5.45	34.28	6.27	-34.93	35.49	280.18	34.44	14.50	-33.13	36.16	293.64	0.16	0.68	8.40	8.43
	1-10	6.45	34.28	6.27	-34.93	35.49	280.18	34.95	15.16	-32.43	35.80	295.05	0.67	0.31	9.23	9.26
	1-11	7.45	34.28	6.27	-34.93	35.49	280.18	34.94	16.08	-32.27	36.05	296.49	0.66	0.57	10.15	10.19
B(V)	1-2	0.85	29.19	11.87	-33.24	35.30	289.65	29.76	11.99	-33.59	35.67	289.64	0.57	0.37	-0.00	0.68
	1-3	1.65	29.19	11.87	-33.24	35.30	289.65	31.12	11.74	-33.62	35.61	289.25	1.93	0.32	-0.25	1.97
	1-4	2.40	29.19	11.87	-33.24	35.30	289.65	32.12	11.67	-33.77	35.73	289.06	2.93	0.43	-0.36	2.98
	1-5	3.60	29.19	11.87	-33.24	35.30	289.65	33.19	11.58	-33.94	35.86	288.84	4.00	0.57	-0.50	4.07
	1-6	-	29.19	11.87	-33.24	35.30	289.65	34.13	11.45	-33.94	35.82	288.64	4.94	0.52	-0.63	5.01
	1-7	4.55	29.19	11.87	-33.24	35.30	289.65	34.97	11.47	-34.14	36.02	288.57	5.78	0.72	-0.67	5.86
	1-8	4.85	29.19	11.87	-33.24	35.30	289.65	35.82	11.33	-34.29	36.11	288.28	6.63	0.82	-0.85	6.73
	1-9	5.35	29.19	11.87	-33.24	35.30	289.65	36.68	11.43	-34.59	36.43	288.29	7.49	1.13	-0.85	7.62
	1-10	6.45	29.19	11.87	-33.24	35.30	289.65	37.85	11.33	-34.76	36.56	288.05	8.66	1.26	-1.00	8.81
	1-11	7.60	29.19	11.87	-33.24	35.30	289.65	38.59	11.31	-34.87	36.66	287.97	9.40	1.36	-1.06	9.56
B(C)	1-2	0.90	34.47	9.13	-29.18	30.57	287.37	34.25	9.64	-30.24	31.74	287.68	-0.22	1.16	0.17	1.20
	1-3	1.20	34.47	9.13	-29.18	30.57	287.37	34.33	9.90	-30.96	32.50	287.73	-0.14	1.93	0.20	1.94
	1-4	1.70	34.47	9.13	-29.18	30.57	287.37	34.27	10.37	-31.93	33.57	287.99	-0.20	3.00	0.35	3.02
	1-5	2.05	34.47	9.13	-29.18	30.57	287.37	34.25	10.85	-32.92	34.66	288.24	-0.22	4.09	0.49	4.12
	1-6	2.55	34.47	9.13	-29.18	30.57	287.37	34.08	11.52	-34.03	35.93	288.70	-0.39	5.35	0.77	5.42
	1-7	3.30	34.47	9.13	-29.18	30.57	287.37	34.20	11.66	-34.67	36.58	288.59	-0.27	6.00	0.71	6.05
	1-8	3.65	34.47	9.13	-29.18	30.57	287.37	34.18	12.12	-35.77	37.77	288.72	-0.29	7.19	0.80	7.24
	1-9	4.45	34.47	9.13	-29.18	30.57	287.37	34.12	12.49	-36.65	38.72	288.82	-0.35	8.14	0.87	8.20
	1-10	4.65	34.47	9.13	-29.18	30.57	287.37	33.92	13.17	-37.92	40.14	289.15	-0.55	9.57	1.09	9.64
	1-11	5.60	34.47	9.13	-29.18	30.57	287.37	33.86	13.49	-38.66	40.95	289.24	-0.61	10.37	1.15	10.45

6.4 均等色差空間を用いた色差式 (NCDF、NCDF-1 及び NCDF-2)

CIELAB をベースにして、マンセル表色系に対して、より良い相関量が得られるように開発された均等色差空間における 2 色の色差は、CIELAB と同様に式(6-4)で定義することができる。

$$\Delta E^{*'} = \{(\Delta L^*)^2 + (\Delta H^{*'})^2 + (\Delta C^{*'})^2\}^{1/2} \quad (6-4)$$

ここで、 ΔL^* : 2 色の明度指數 L^* の差

$\Delta H^{*'} :$ 2 色の色相差の補正係数 $F(H)$ を用いて補正したメトリック
色相差

$\Delta C^{*'} :$ 2 色のクロマ差の補正係数 $F(C)$ を用いて補正したメトリック
クロマ差

しかし、6.2 節及び 6.3 節で述べたように知覚色差と測色色差との回帰分析の結果から、メトリック色相差 ($\Delta H^{*'}$) 及びメトリッククロマ差 ($\Delta C^{*'}$) に、クロマの大きさを考慮した規準化が必要であることが示唆された。このため、式(6-4)に規準化のための重み付け係数を導入した式(6-5)で色差を計算することが適當と考えられる。

$$\Delta E^{*'} = \{(\Delta L^*/k(L))^2 + (\Delta H^{*'} / k(H))^2 + (\Delta C^{*'} / k(C))^2\}^{1/2} \quad (6-5)$$

ここで、 $k(L)$: メトリック明度差 (ΔL^*) の重み付け係数で、 $k(L)=1.0$ 。

$k(H)$: メトリック色相差 ($\Delta H^{*'}$) のクロマ依存性を考慮した
重み付け係数

$k(C)$: メトリッククロマ差 ($\Delta C^{*'}$) のクロマ依存性を考慮した
重み付け係数

$k(H)$ 及び $k(C)$ は、6.2 節及び 6.3 節から、式(6-6)及び式(6-7)に示すメトリック
クロマ ($C^{*'}$) の関数で定義する。

$$\begin{aligned} k(H) &= 1 + (1/C^{*'}_{65}) \times C^{*'} \\ &= 1 + 0.0176 \times C^{*'} \end{aligned} \quad (6-6)$$

$$\begin{aligned} k(C) &= 1 + (2/C^{*'}_{40}) \times C^{*'} \\ &= 1 + 0.05 \times C^{*'} \end{aligned} \quad (6-7)$$

$k(H)$ の係数が、式(6-1)及び式(6-2)と異なる理由は、図 6.5～図 6.7 の知覚色差と

測色色差の回帰式の傾きから、測色色差がやや大きく計算されることを考慮したものである。ただし、式(6-6)の係数は、表 5.1～表 5.3 のどの補正関数 $F(H)$ を適用するかによって若干異なり、NCDF では 0.0171、NCDF-1 では 0.0182 及び NCDF-2 では 0.0175 なる。式(6-6)の係数は、これらの係数の平均値を採用している。また、式(6-7)の定数項の 1 は、式(6-6)と同様に $C^* = 0$ のときの異常値を避けるためのものである。

NCDF、NCDF-1 及び NCDF-2 の色差式としての特徴を、式(6-5)によって 2 色の色差を計算した結果によって示す。計算手順を以下に示す。

(1) 2 色の CIELAB の色座標を三刺激値 XYZ から計算した値を次のとおりとする。

$$\text{マンセル記号 } 2.5\text{YR } 7/4 \quad L^*_1 = 70.86 \quad a^*_1 = 12.26 \quad b^*_1 = 16.79$$

$$\text{マンセル記号 } 5.0\text{YR } 7/4 \quad L^*_2 = 70.86 \quad a^*_2 = 10.10 \quad b^*_2 = 19.92$$

(2) メトリッククロマ(C^*)、メトリック色相角(h°)、メトリッククロマ差(ΔC^*)及びメトリック色相差(ΔH^*)を計算する。

$$C^*_1 = (a^{*12} + b^{*12})^{1/2} = 20.79 \quad h^\circ_1 = \tan^{-1}(b^{*1}/a^{*1}) = 53.9$$

$$C^*_2 = (a^{*22} + b^{*22})^{1/2} = 22.33 \quad h^\circ_2 = \tan^{-1}(b^{*2}/a^{*2}) = 63.1$$

$$\Delta C^* = C^*_2 - C^*_1 = 1.54$$

$$\Delta H^* = 2(C^*_1 \times C^*_2)^{1/2} \times \sin((h^\circ_2 - h^\circ_1)/2) = +3.48$$

(3) クロマ差の補正係数 $F(C)$ を用いて、クロマスケールの補正を行う。

$$C^*_1' = C^*_1 / F(C) = 19.43 \quad C^*_2' = 19.55 \quad \Delta C^* = 0.12$$

(4) クロマスケールの補正後の色座標を計算する。

$$a^{*1'} = C^*_1' \times \cos(h^\circ_1) = 11.46 \quad b^{*1'} = C^*_1' \times \sin(h^\circ_1) = 15.69$$

$$a^{*2'} = C^*_2' \times \cos(h^\circ_2) = 8.85 \quad b^{*2'} = C^*_2' \times \sin(h^\circ_2) = 17.43$$

(5) 必要であれば無彩色点の補正を行う。例えば、無彩色補正方法 I (NCDF-1) で補正する。補正後に、色相角を計算する。

$$a^{*1''} = a^{*1'} + \Delta a^* = 11.54 \quad b^{*1''} = b^{*1'} + \Delta b^* = 15.40 \quad h^\circ_1' = 53.14$$

$$a^{*2''} = a^{*2'} + \Delta a^* = 8.92 \quad b^{*2''} = b^{*2'} + \Delta b^* = 17.14 \quad h^\circ_2' = 62.50$$

(6) メトリック色相差(ΔH^*)を計算し、色相差の補正係数 $F(H)$ で補正する。

$$\Delta H^* = 2(C^*_1 \times C^*_2)^{1/2} \times \sin((h^\circ_2 - h^\circ_1)/2) / F(H) = 2.87$$

(7)式(6-6)及び式(6-7)により、 $k(H)$ 及び $k(C)$ を計算する。ただし、 \bar{C}^* は手順(3)で求めた2色の補正したメトリッククロマの平均値。

$$k(H) = 1 + 0.0176 \times \bar{C}^* = 1.343$$

$$k(C) = 1 + 0.05 \times \bar{C}^* = 1.974$$

(8)式(6-5)により、色差を計算する。

$$\begin{aligned}\Delta E^* &= \{(\Delta L^*)^2 + (\Delta H^*/k(H))^2 + (\Delta C^*/k(C))^2\}^{1/2} \\ &= \{(70.86 - 70.86)^2 + (2.87/1.343)^2 + (0.12/1.974)^2\}^{1/2} \\ &= 2.13\end{aligned}$$

マンセル表色系で色相だけが異なり、明度及び彩度が同じ2色の色差を、NCDF-1を用いて計算する手順を示した。CIELABでは、手順(2)で計算されるメトリッククロマ差(ΔC^*)が、彩度が等しいにもかかわらず $\Delta C^* = 1.54$ と大きな値を示すのに対して、NCDF-1では手順(3)で計算されるように $\Delta C^* = 0.12$ (重み付けをした場合は、0.06)と小さく、ほぼ2色の差はメトリック色相差だけが算定されている。

このことは、CIELABを基本とした修正式であるCIE94及びCIEDE2000では、マンセル表色系で色相だけが異なる2色の色差に、クロマ差が混入する欠点があることを示している。CIE94及びCIEDE2000では、このようなノイズを含めた心理メトリック量に重み付けを行って色差を求めており、本質的な問題を内包している。表6.5に他の色差式による結果を示す。

表6.5 色相だけが異なる2色の色差計算におけるクロマ差

色差式	CIELAB	CIE94	CIEDE2000	MLAB	CMC	NCDF-1
ΔL	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ΔH	3.48	2.85	3.64	2.14	5.57	2.14
ΔC	1.54	0.93	0.27	0.46	0.92	0.06
ΔE	3.8	3.0	3.6	2.2	5.6	2.1

注) 表中の、 ΔL 、 ΔH 、 ΔC は、各色差式での重み付け係数を適用した値を示す。

マンセル表色系に対して、より良い相関量が得られるように開発された均等色差空間では、このようなノイズが生じないか、ごく小さくなるように補正されている。この効果は、マンセル表色系が普及している我が国の実情を考慮すると、均等色差空間を用いて式(6-6)及び式(6-7)で定義する係数で心理メトリック量に重み付けを行って色差を求める色差式の利点の一つといえる。

6. 5 結論

均等色差空間で計算されるメトリック色相差は、計算する色のメトリッククロマの大きさに比例して大きくなる。しかし、知覚される色相差は、クロマによって変化しないため、メトリック色相差が、クロマが変化しても同じ値になるよう補正する必要がある。このため、マンセル表色系の $\Delta H=2.5$ step の色差が、 $\Delta V=1.0$ 及び $\Delta C=2.0$ の差である $\Delta L^* \approx 10$ 並びに $\Delta C^* \approx 10$ に概ね等しくなるようなクロマのメトリック色相差を規準とする補正関数 $k(H)$ を決定した。また、色差属性によって知覚される色差と比較した結果、メトリック明度差及びメトリック色相差に比較してメトリッククロマ差が大きく計算されることを示し、色差属性間の大きさを調整するための補正関数 $k(C)$ を決定した。

均等色差空間での色差を計算するために、 $k(H)$ 及び $k(C)$ を組み合わせた色差式を提案した。この色差式による計算手順をマンセル表色系で明度と彩度が等しく、色相だけが異なる 2 色の例として示した。その結果、CIELAB、CIE94 及び他の色差式では、色相だけが異なるにもかかわらず、2 色の間にはクロマ差が計算される欠点があることを明らかにした。これに対して、提案した色差式では、クロマ差がほぼゼロになることを示した。この効果は、提案した色差式の利点の一つである。

参考文献

- 1) S.M.Newhall et al : J.Opt.Soc.Amer.,33,385(1943)
- 2) D.Nickerson : Textile Res.,6,505(1936)
- 3) R.McDonald : J.S.D.C.,96,486(1980)
- 4) H.Komatsubara : Colour'85(1985)

第7章 開発した色差式の性能試験と色材産業への応用

7. 1 序論

CIE 色差式は、塗料、染色、インク及びプラスチックを使って、製品の着色加工を行っている産業界において広く利用されている。製品色として指定されている色に塗料や染料などの色材を使って色合わせをして作られる試作色は、指定色とは同じ色に仕上がることは少なく、わずかに色違いが生じる。一般に、一定の色違いの範囲内であれば、指定色と同等とみなして製品の製造を行う。この指定色と試作色との色の比較及び合否判定は、色合わせを行う調色技能者や品質検査を担当する検査員が担当することが多い。担当者の色違いの識別能力や合否の判定能力の違いによって、判定結果が異なることがしばしば生じる。このため、測色機器を使って測定した三刺激値 XYZ から CIELAB の色座標に変換して色差を計算し、色違いの程度及び合否判定を行っている。しかし、第3章で述べたように CIELAB から求められる測色色差と実際に知覚される色差との間に不一致が生じることから、CIE 色差式だけでなく様々な色差式が利用されている。CIE94 及び CIEDE2000 は塗装製品及び繊維製品の色差観測データと測色色差との一致性を改善することを目的に提案されている。それぞれ適用した各色差観測データに対する最適解が得られるようにした補正係数が実験的に決定されている。このため、異なった色差観測データについては、測色色差と一致しない場合が生じる。この結果、色差式と知覚色差との一致性を評価する際に、使用する色差観測データによって、評価結果に違いが生じるという問題がある。一方、NCDF は、色差観測データではなく、色知覚空間として広く利用されているマンセル表色系の等歩度性に着目して開発したもので、特定の色差観測データに依存していないことを特徴としている。そこで、公表されている色差観測データを用いて、CIE94 及び CIEDE2000 をはじめとする代表的な色差式との性能比較を行い、NCDF の産業応用としての有効性を検討する。

使用する色差観測データは、CIE94 の開発に用いられた DUPON-DATASET、陶磁器タイル製造工業の代表的な製品色を用いた ICD-DATASET 及び CIE の色差研究のためのガイドラインに示された 5 色を用いた WITT-DATASET の 3 種類である。

7. 2 DUPON-DATASET による性能試験

DUPON-DATASET¹⁾は、R.Berns らが、アクリルラッカー塗料によって色合わせされた中心色 19 色及びその周辺色を作成して得られた 156 種類の色差対に

ついて、恒常法を用いて知覚される色差を観測したデータである。観測データは、試験色差対の知覚される色差を、参照色差対と比較して大きいか小さいかを判定した判断確率に、恒常法の解析手法の一つであるプロビット法を適用して推定された閾値である。観測者は色覚正常者 50 名～121 名である。中心色には、CIELAB が 1978 年に勧告した色差研究のためのガイドライン²⁾で採用した物体色 5 色（赤、黄、緑、青及び灰色）が含まれている。

参照色差対及び試験色差対の構成は、 $L^*=38$ で大きさが 15 cm × 10 cm の灰色背景上に、6.5 cm × 5 cm の 2 色の色を隣接併置して配置したものである。参照色差対は、次の 2 色を配置したもので、ほぼ色差 $\Delta E=1.0$ になっている。

$$L^*_1 = 49.53 \quad a^*_1 = -0.08 \quad b^*_1 = -5.65$$

$$L^*_2 = 48.89 \quad a^*_2 = 0.17 \quad b^*_2 = -4.90$$

$$\Delta L^* = -0.64 \quad \Delta a^* = 0.25 \quad \Delta b^* = 0.75 \quad \Delta E^* = 1.02$$

試験色差対は、図 7.1 に示す中心色に対して、明度及び色度がある特定方向に微少ステップずつ変化するように作られており、参照色差対に対してランダムに提示される。

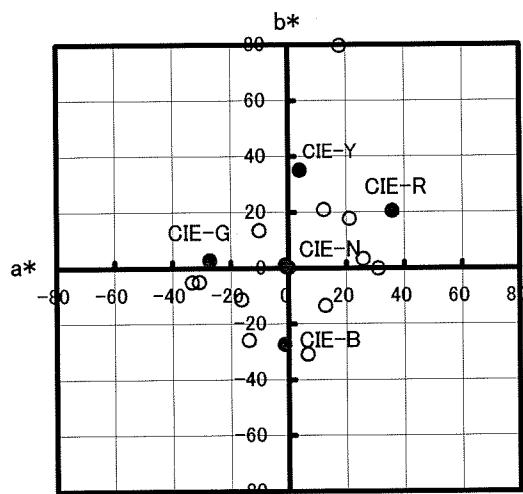


図 7.1 DUPON-DATASET の評価用刺激

試験色差対の基準色の色座標、基準色からの色差方向、推定閾値色及び推定色差を表 7.1.1～表 7.1.5 に示す。表 7.1.1～表 7.1.5 の推定閾値色は、次の手順によって計算した。

- (1) 基準色に対する色差方向のベクトルと閾値 (T50) の積 (色差成分) を計算する。

計算例 色： m.B(CIE) 種類： A

$$T50 = 0.96 \quad \Delta L^* = 0.985 \quad \Delta a^* = 0.173 \quad \Delta b^* = -0.013$$

$$T50 \times \Delta L^* = 0.946 \quad T50 \times \Delta a^* = 0.166 \quad T50 \times \Delta b^* = -0.012$$

(2)色差成分と基準色の色座標を加えて閾値推定色の色座標とする。

$$L^*(T) = L^*(S) + T50 \times \Delta L^* = 36.11 + 0.946 = 37.06$$

$$a^*(T) = a^*(S) + T50 \times \Delta a^* = -1.35 + 0.166 = -1.18$$

$$b^*(T) = b^*(S) + T50 \times \Delta b^* = -27.30 + (-0.012) = -27.31$$

(3)基準色と閾値推定色から色差を計算する。

$$\Delta L^* = L^*(T) - L^*(S) = 37.06 - 36.11 = 0.95$$

$$\Delta a^* = a^*(T) - b^*(S) = (-1.18) - (-1.35) = 0.17$$

$$\Delta b^* = a^*(T) - b^*(S) = (-27.31) - (-27.30) = -0.01$$

$$\Delta E^* = 0.96$$

観測者は、参照色差対と比較して試験色差対の色差が大きく知覚されるか、小さく知覚されるかを判定しているため、その結果から得られる閾値は、参照色差対の色差 $\Delta E=1.0$ に相当する知覚色差になる。従って、観測者の知覚色差を良好に予測することが期待される色差式には、基準色と閾値推定色から計算される色差がほぼ $\Delta E=1.0$ になることが要求される。表 7.1.1～表 7.1.5 の推定色差は、CIELAB による結果を示したものである。156 種類の色差対の平均色差及び標準偏差は、 $\Delta E=1.44$ 及び $\sigma=0.512$ になっている。標準偏差の 2 倍を平均色差の範囲とすると、 $\Delta E=0.42\sim2.46$ の範囲で、基準色と推定色の色差がばらついていることになり、期待される $\Delta E=1.0$ とは大きく偏っている。CIE 色差式によって予測される色差が、色の種類及び色差属性によって、知覚色差と一致しないことを意味する。

CIE の色差研究のためのガイドラインが勧告された 1978 年以降、主として、1985 年以降に国際規格や国際学会で提案された CIE94³⁾、CIEDE2000⁴⁾、CMC(1:1)⁵⁾、MLAB⁶⁾及び NCDF (NCDF-1 及び NCDF-2 を含む) を用いて、DUPON-DATASET の観測データを予測した結果を表 7.2～表 7.4 に示す。

表 7.2 は 156 種類の色差対の結果を、表 7.3 は CIE ガイドラインの物体色の中で有彩色 4 色についての結果を、表 7.4 は表 7.3 に灰色を加えた CIE ガイドラインの物体色 5 色についての結果を示す。表中の平均値 (M) は推定色差の平均値 ΔE_M 、標準偏差 (S) は推定色差の偏差を示す。また、表中の S/M は、色差式に

よって推定色差の平均値が異なることから、期待値 $\Delta E=1.0$ からのバラツキの大きさを比較するために、平均値で規準化した値である。知覚色差に対する良好な予測が期待されるためには、平均値が $\Delta E=1.0$ に近似し、S/M の値ができるだけ小さいことが必要になる。

表 7.2 の色差式の違いによる平均値及び S/M の値を図 7.2 に示す。また、平均値及び S/M の期待値に対する近似度をランク（順位）によって比較すると、表 7.2 から、CIE94 が知覚色差との一致性が最も優れており、次ぎに NCDF の順になっている。CIE94 が DUPON-DATASET に基づいて最適化されていることを反映している。

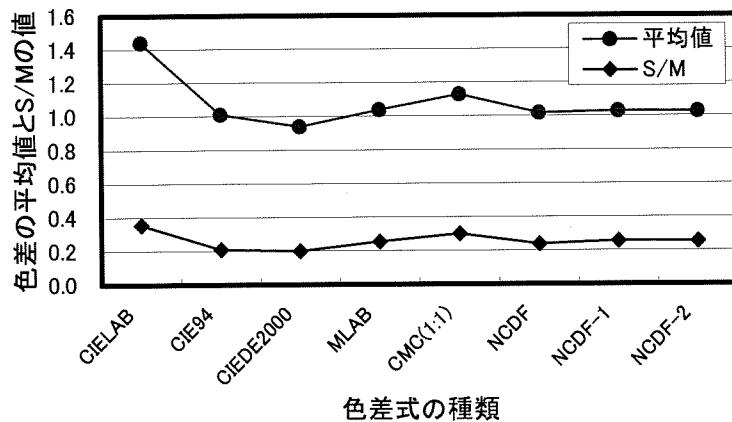


図 7.2 DUPON-DATASET の全データによる色差の平均値と S/M

表 7.2 DUPON-DATASET の全データを用いた色差式の性能比較結果

色差式	CIELAB	CIE94	CIEDE2000	MLAB	CMC(1:1)	NCDF	NCDF-1	NCDF-2
平均値 : M	1.44	1.01	0.94	1.04	1.13	1.02	1.03	1.03
標準偏差 : S	0.512	0.213	0.188	0.264	0.339	0.241	0.265	0.262
S/M	0.356	0.210	0.200	0.255	0.300	0.237	0.257	0.255
ランク (M)	8	1	6	5	7	2	3	3
ランク (S/M)	8	2	1	5	7	3	6	4

CIEDE2000 は、S/M の値が最も小さく、色差対の色によるバラツキが少ないが、平均値が $\Delta E_M = 0.94$ と小さく $\Delta E = 1.0$ からのずれが大きい。重み付けによる補正が大きすぎる結果になっている。CIEDE2000 で採用されている係数は、最適解を得るために使用した色差観測データに依存していることが示唆される。

表 7.3 の色差式の違いによる平均値及び S/M の値を図 7.3 に示す。平均値及び S/M の期待値に対する近似度のランク（順位）による比較では、CIE94 及び CIEDE2000 の平均値が小さく、CIE ガイドラインの比較的高彩度の色について、重み付けによる補正が大きすぎることを示している。S/M の値は、MLAB が最も小さな値になっている。MLAB が、CIE ガイドラインの有彩色 4 色を用いた色差属性と知覚色差との関係を示す図 6.4 の結果から得られた重み付け係数を採用していることに起因している。ただし、MLAB の重み付け係数は、式(6-6)及び式(6-7)のようなメトリッククロマの関数ではなく、 $k(L)=1.0$ 、 $k(H)=0.75$ 及び $k(C)=0.5$ を用いている。このため、表 7.4 のように無彩色を加えた結果では S/M の値が大きくなっている。重み付け係数を色座標の関数とすることの有効性を示唆している。表 7.4 の色差式の違いによる平均値及び S/M の値を図 7.4 に示す。

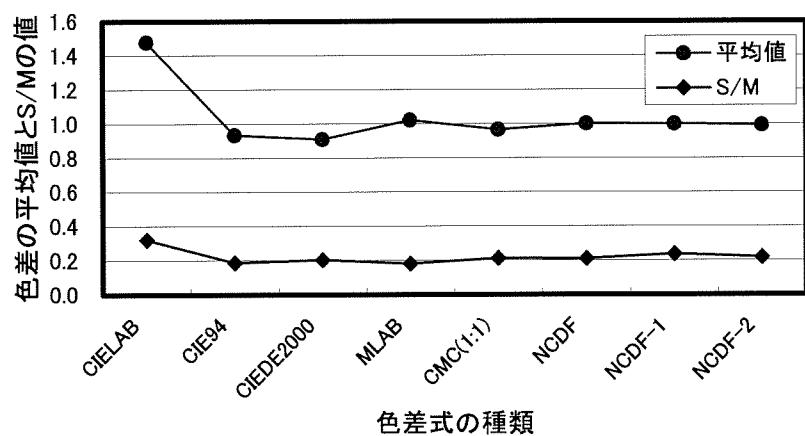


図 7.3 DUPON-DATASET の CIE ガイド 4 色の平均色差と S/M

表 7.3 DUPON-DATASET の中の CIE ガイド 4 色を用いた色差式の性能比較結果

色差式	CIELAB	CIE94	CIEDE2000	MLAB	CMC(1:1)	NCDF	NCDF-1	NCDF-2
平均値 : M	1.48	0.93	0.91	1.02	0.96	1.00	1.00	0.99
標準偏差 : S	0.476	0.174	0.186	0.185	0.206	0.211	0.237	0.217
S/M	0.322	0.187	0.204	0.181	0.213	0.211	0.237	0.219
ランク (M)	8	6	7	4	5	1	1	3
ランク (S/M)	8	2	3	1	5	4	7	6

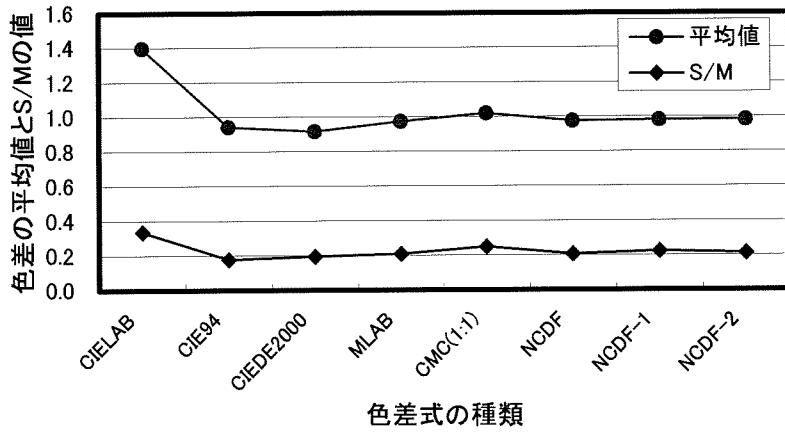


図 7.4 DUPON-DATASET の CIE ガイド 5 色の平均色差と S/M

表 7.4 DUPON-DATASET の中の CIE ガイド 5 色を用いた色差式の性能比較結果

色差式	CIELAB	CIE94	CIEDE2000	MLAB	CMC(1:1)	NCDF	NCDF-1	NCDF-2
平均値 : M	1.40	0.94	0.92	0.97	1.02	0.98	0.98	0.98
標準偏差 : S	0.470	0.168	0.178	0.202	0.254	0.202	0.219	0.209
S/M	0.322	0.178	0.194	0.208	0.249	0.207	0.223	0.213
ランク (M)	8	6	7	4	1	1	1	1
ランク (S/M)	8	1	2	4	7	3	6	5

CIELAB 以外の 7 種類の色差式は、CIELAB と比較して知覚色差を良好に予測するが、対象となる色差対の種類によって、やや異なった結果を示す。表 7.2～表 7.4 のランクを総合した結果は、NCDF>CIE94>NCDF-2>MLAB>NCDF-1>CIEDE2000>CMC(1:1)>CIELAB の順になっている。S/M のランクを優先すると、CIE94>CIEDE2000>NCDF=MLAB>NCDF-2>NCDF-1=CMC(1:1)>CIELAB の順になる。DUPON-DATASET に基づいて最適化された CIE94 が、知覚色差との関係も良好な結果になっているが、DUPON-DATASET には関係なく開発された NCDF の結果も CIE94 と遜色ない結果になっている。このことは、均等色知覚空間の等差性に着目して開発された均等色差空間及びその色差式の有効性を意味している。NCDF と NCDF-1 及び NCDF-2 の違いは、無彩色点補正の有無であるが、無彩色点を補正しない NCDF が知覚色差との一致性が高くなっている。表 7.2 及び表 7.4 の NCDF-1 と NCDF-2 の S/M の比較から、色差対の色によって、無彩色の補正が有効に働いていないことが推定される。この点については、

ICD-DATASET 及び WITT-DATASET を用いた性能試験の結果で、あらためて考察する。

表 7.1.1 DUPON-DATASET の試験色色差対の基準色及び閾値推定値

色	種類	閾値			基準色			色差方向			色差成分			閾値推定色			推定色差 dE
		T50	L*(S)	a*(S)	b*(S)	dL*	da*	db*	T50 × dL*	T50 × da*	T50 × db*	L*(T)	a*(T)	b*(T)			
m.B(CIE)	A	0.96	36.11	-1.35	-27.30	0.985	0.173	-0.013	0.946	0.166	-0.012	37.06	-1.18	-27.31	0.96		
	B	1.37	35.85	-1.40	-27.12	-0.017	0.997	-0.078	-0.023	1.366	-0.107	35.83	-0.03	-27.23	1.37		
	C	1.55	35.86	-1.51	-26.93	-0	0.295	0.946	-0.208	0.457	1.466	35.65	-1.05	-25.46	1.55		
	D	1.01	35.92	-1.62	-28.36	-0.003	0.691	0.723	-0.003	0.698	0.730	35.92	-0.92	-27.63	1.01		
	E	3.22	36.29	-1.66	-28.44	-0.027	-0.356	0.934	-0.087	-1.146	3.007	36.20	-2.81	-25.43	3.22		
	F	1.06	34.72	-1.35	-28.24	0.298	0.792	0.533	0.316	0.840	0.565	35.04	-0.51	-27.68	1.06		
	G	1.18	36.22	-1.74	-28.30	0.683	-0.450	0.575	0.806	-0.531	0.679	37.03	-2.27	-27.62	1.18		
	H	0.87	34.77	-1.24	-27.99	-0.595	0.629	0.501	-0.518	0.547	0.436	34.25	-0.69	-27.55	0.87		
m.gB	I	1.53	33.18	-1.09	-28.10	0.433	0.654	-0.621	0.662	1.001	-0.950	33.84	-0.09	-29.05	1.53		
	A	0.78	50.65	-16.21	-11.23	0.998	0.032	-0.044	0.778	0.025	-0.034	51.43	-16.19	-11.26	0.78		
	B	1.62	50.77	-16.18	-11.08	-0.076	0.996	-0.049	-0.123	1.614	-0.079	50.65	-14.57	-11.16	1.62		
	C	1.62	50.65	-16.08	-11.00	-0.078	0.351	0.933	-0.126	0.569	1.511	50.52	-15.51	-9.49	1.62		
	D	1.53	50.77	-16.28	-11.63	0.039	0.806	0.591	0.060	1.233	0.904	50.83	-15.05	-10.73	1.53		
	E	1.48	50.82	-16.15	-11.10	0.018	-0.486	0.874	0.027	-0.719	1.294	50.85	-16.87	-9.81	1.48		
	F	1.24	49.96	-16.69	-11.38	0.466	0.752	0.466	0.578	0.932	0.578	50.54	-15.76	-10.80	1.24		
	G	1.00	49.89	-16.55	-11.36	0.664	-0.401	0.631	0.664	-0.401	0.631	50.55	-16.95	-10.73	1.00		
m.Gy(CIE)	H	1.19	49.83	-16.43	-11.20	-0.605	0.673	0.427	-0.720	0.801	0.508	49.11	-15.63	-10.69	1.19		
	I	0.87	48.99	-16.80	-11.39	0.801	0.413	-0.434	0.697	0.359	-0.378	49.69	-16.44	-11.77	0.87		
	A	0.94	59.78	-0.99	1.25	0.999	0.041	0.025	0.939	0.039	0.024	60.72	-0.95	1.27	0.94		
	B	0.87	59.97	-0.93	1.28	-0.090	0.985	-0.043	-0.078	0.866	-0.037	59.89	-0.06	1.24	0.87		
	C	1.32	59.64	-1.01	1.21	-0.029	0.099	0.995	-0.038	0.131	1.313	59.60	-0.88	2.52	1.32		
	D	0.93	59.55	-1.12	1.07	-0.007	0.763	0.647	-0.007	0.710	0.602	59.54	-0.41	1.67	0.93		
	E	1.27	59.52	-0.98	1.25	-0.007	-0.644	0.765	-0.009	-0.818	0.972	59.51	-1.80	2.22	1.27		
	F	1.03	58.99	-0.53	0.81	0.733	0.417	0.538	0.755	0.430	0.554	59.74	-0.10	1.36	1.03		
lt.Br	G	1.01	59.09	-0.45	0.90	0.683	-0.430	0.591	0.690	-0.434	0.597	59.78	-0.88	1.50	1.01		
	H	0.87	58.62	-0.49	0.91	-0.616	0.462	0.645	-0.536	0.393	0.561	58.08	-0.10	1.47	0.87		
	I	0.93	58.85	-0.54	0.76	0.671	0.414	-0.615	0.624	0.385	-0.572	59.47	-0.15	0.19	0.93		
	A	0.90	63.54	12.36	20.91	0.993	0.086	0.082	0.894	0.077	0.074	64.43	12.44	20.98	0.90		
	B	1.39	63.67	12.37	20.86	-0.049	0.993	0.105	-0.068	1.380	0.146	63.60	13.75	21.01	1.39		
	C	1.63	63.93	12.25	20.64	0.056	0.137	0.989	0.091	0.223	1.612	64.02	12.47	22.25	1.63		
	D	1.59	63.61	12.18	20.76	-0.021	0.751	0.659	-0.033	1.194	1.048	63.58	13.37	21.81	1.59		
	E	1.14	63.75	12.17	20.73	-0.069	0.747	-0.662	-0.079	0.852	-0.755	63.67	13.02	19.98	1.14		
lt.Br	F	1.50	63.03	12.80	20.09	0.528	0.595	0.607	0.792	0.893	0.911	63.82	13.69	21.00	1.50		
	G	1.07	60.50	13.66	21.20	0.723	-0.563	0.401	0.774	-0.602	0.429	61.27	13.06	21.63	1.07		
	H	1.15	61.26	13.20	20.82	-0.681	0.551	0.482	-0.783	0.634	0.554	60.48	13.83	21.37	1.15		
	I	1.01	63.06	12.46	19.13	0.618	0.553	-0.560	0.624	0.559	-0.566	63.68	13.02	18.56	1.01		

表 7.1.2 DUPON-DATASET の試験色色差対の基準色及び閾値推定値

色 m.bG(CIE)	種類	閾値 T50	基準色			色差方向			色差成分			閾値推定色			推定色差 dE	
			L*(S)	a*(S)	b*(S)	dL*	da*	db*	T50 × dL*	T50 × da*	T50 × db*	L*(T)	a*(T)	b*(T)		
A	A	0.96	55.53	-27.10	2.83	0.997	0.083	0.005	0.957	0.080	0.005	56.49	-27.02	2.83	0.96	
A	B	0.98	55.63	-27.37	2.06	0.998	0.066	0.015	0.978	0.065	0.015	56.61	-27.31	2.07	0.98	
B	B	2.28	55.57	-27.11	2.80	0.004	0.996	-0.090	0.009	2.271	-0.205	55.58	-24.84	2.59	2.28	
B	C	2.49	55.47	-27.47	2.10	0.023	0.998	-0.063	0.057	2.485	-0.157	55.53	-24.98	1.94	2.49	
C	C	1.30	55.88	-27.21	2.76	-0.010	0.266	0.964	-0.013	0.346	1.253	55.87	-26.86	4.01	1.30	
C	D	1.23	55.90	-27.43	1.98	-0.014	0.262	0.965	-0.017	0.322	1.187	55.88	-27.11	3.17	1.23	
D	D	1.68	55.63	-27.25	2.76	0.012	0.847	0.531	0.020	1.423	0.892	55.65	-25.83	3.65	1.68	
D	E	1.78	55.64	-27.62	1.97	0.033	0.837	0.546	0.059	1.490	0.972	55.70	-26.13	2.94	1.78	
E	E	1.77	55.56	-27.06	2.80	0.052	-0.666	0.744	0.092	-1.179	1.317	55.65	-28.24	4.12	1.77	
E	F	1.83	55.61	-27.33	2.15	0.064	-0.679	0.731	0.117	-1.243	1.338	55.73	-28.57	3.49	1.83	
F	F	1.28	55.66	-28.28	2.23	0.543	0.687	0.483	0.695	0.879	0.618	56.36	-27.40	2.85	1.28	
G	G	1.49	55.60	-28.21	2.29	0.615	-0.474	0.631	0.916	-0.706	0.940	56.52	-28.92	3.23	1.49	
H	H	1.29	55.44	-28.09	2.22	-0.585	0.712	0.389	-0.755	0.918	0.502	54.69	-27.17	2.72	1.29	
I	I	1.17	55.53	-28.15	2.28	0.575	0.595	-0.562	0.673	0.696	-0.658	56.20	-27.45	1.62	1.17	
<i>g,P</i>		A	0.94	46.48	12.76	-13.44	0.995	-0.005	0.096	0.935	-0.005	0.090	47.42	12.76	-13.35	0.94
		B	1.47	46.31	12.74	-13.34	0.030	0.991	-0.134	0.044	1.457	-0.197	46.35	14.20	-13.54	1.47
		C	1.67	46.44	12.61	-13.15	0.033	0.079	0.996	0.055	0.132	1.663	46.50	12.74	-11.49	1.67
		D	1.23	46.52	12.68	-13.40	0.064	0.815	0.576	0.079	1.002	0.708	46.60	13.68	-12.69	1.23
		E	2.88	46.59	12.64	-13.55	-0.066	-0.609	0.790	-0.190	-1.754	2.275	46.40	10.89	-11.27	2.88
		F	1.02	46.37	11.52	-12.74	0.495	0.725	0.479	0.505	0.740	0.489	46.87	12.26	-12.25	1.02
		G	1.42	46.50	11.45	-12.65	0.532	-0.543	0.650	0.755	-0.771	0.923	47.26	10.68	-11.73	1.42
		H	1.03	46.11	11.55	-12.72	-0.581	0.705	0.407	-0.598	0.726	0.419	45.51	12.28	-12.30	1.03
		I	1.25	46.18	11.43	-12.72	0.693	0.504	-0.516	0.866	0.630	-0.645	47.05	12.06	-13.37	1.25
<i>dk,rO(CIE)</i>		A	0.94	42.33	35.94	20.39	0.999	-0.031	-0.014	0.939	-0.029	-0.013	43.27	35.91	20.38	0.94
		B	1.94	41.48	35.71	20.41	0.014	1.000	0.002	0.027	1.940	0.004	41.51	37.65	20.41	1.94
		C	1.73	41.56	35.85	21.71	-0.024	0.008	1.000	-0.042	0.014	1.730	41.52	35.86	23.44	1.73
		D	2.01	41.86	35.78	20.33	0.008	0.689	0.725	0.016	1.385	1.457	41.88	37.16	21.79	2.01
		E	1.32	41.90	35.96	20.46	-0.041	-0.616	0.787	-0.054	-0.813	1.039	41.85	35.15	21.50	1.32
		F	1.61	43.11	35.49	22.27	0.551	0.573	0.607	0.887	0.923	0.977	44.00	36.41	23.25	1.61
		G	0.90	43.99	34.57	23.34	0.481	-0.574	0.663	0.433	-0.517	0.597	44.42	34.05	23.94	0.90
		H	1.59	43.35	35.28	22.09	-0.513	0.586	0.627	-0.816	0.932	0.997	42.53	36.21	23.09	1.59
		I	1.25	42.93	35.16	23.56	-0.456	-0.330	0.827	-0.570	-0.413	1.034	42.36	34.75	24.59	1.25

表 7.1.3 DUPON-DATASET の試験色色差対の基準色及び閾値推定値

色	種類	閾値	基準色				色差方向				色差成分				閾値推定色		推定色差 dE
			T50	L*(S)	a*(S)	b*(S)	dL*	da*	db*	T50 × dL*	T50 × da*	T50 × db*	L*(T)	a*(T)	b*(T)		
m.Y(CIE)	A	1.19	76.86	4.02	35.14	1.000	0.015	0.022	1.190	0.018	0.026	78.05	4.04	35.17	1.19	37.46	1.44
	B	1.44	78.31	1.36	37.23	0.058	0.985	0.162	0.084	1.418	0.233	78.39	2.78	37.60	2.20		
	C	2.20	78.47	1.63	35.43	0.130	0.079	0.988	0.286	0.174	2.174	78.76	1.80	37.60	2.20		
	D	1.63	78.63	1.16	34.25	0.160	0.637	0.754	0.261	1.038	1.229	78.89	2.20	35.48	1.63		
	E	1.28	78.52	1.83	33.65	-0.009	0.790	-0.613	-0.012	1.011	-0.785	78.51	2.84	32.87	1.28		
	F	1.47	77.87	1.62	36.29	0.532	0.593	0.604	0.782	0.872	0.888	78.65	2.49	37.18	1.47		
	G	1.40	77.82	1.99	36.30	0.606	-0.441	0.662	0.848	-0.617	0.927	78.67	1.37	37.23	1.40		
	H	1.30	77.74	2.04	36.14	-0.559	0.659	0.504	-0.727	0.857	0.655	77.01	2.90	36.80	1.30		
	I	1.15	77.99	1.78	36.31	0.565	0.638	-0.523	0.650	0.734	-0.601	78.64	2.51	35.71	1.15		
gyG	A	0.86	64.60	-10.00	13.41	0.992	-0.117	0.038	0.853	-0.101	0.033	65.45	-10.10	13.44	0.86		
	B	1.17	64.73	-9.99	13.49	-0.010	0.989	-0.149	-0.012	1.157	-0.174	64.72	-8.83	13.32	1.17		
	C	1.44	64.75	-10.32	13.34	-0.033	0.008	0.999	-0.048	0.012	1.439	64.70	-10.31	14.78	1.44		
	D	1.21	64.83	-10.06	13.45	-0.163	0.729	0.664	-0.197	0.882	0.803	64.63	-9.18	14.25	1.21		
	E	1.72	64.74	-9.07	12.06	0.084	-0.559	0.825	0.144	-0.961	1.419	64.88	-10.03	13.48	1.72		
	F	0.96	65.19	-10.19	13.42	0.654	0.562	0.506	0.628	0.540	0.486	65.82	-9.65	13.91	0.96		
	G	1.43	65.21	-10.10	13.36	0.600	-0.526	0.603	0.858	-0.752	0.862	66.07	-10.85	14.22	1.43		
	H	1.09	65.23	-10.17	13.66	-0.545	0.613	0.572	-0.594	0.668	0.623	64.64	-9.50	14.28	1.09		
	I	1.01	65.16	-10.20	13.34	0.633	0.500	-0.591	0.639	0.505	-0.597	65.80	-9.70	12.74	1.01		
Bk	A	1.22	14.55	-0.62	0.40	0.998	0.055	-0.021	1.218	0.067	-0.026	15.77	-0.55	0.37	1.22		
	B	0.80	14.07	-0.14	0.48	0.252	0.954	-0.164	0.202	0.763	-0.131	14.27	0.62	0.35	0.80		
	C	1.30	13.89	-0.16	0.74	0.353	-0.315	0.881	0.459	-0.410	1.145	14.35	-0.57	1.89	1.30		
	F	1.10	14.00	-0.50	0.52	0.830	0.418	0.369	0.913	0.460	0.406	14.91	-0.04	0.93	1.10		
	G	1.07	14.42	-0.45	0.44	0.531	-0.599	0.599	0.568	-0.641	0.641	14.99	-1.09	1.08	1.07		
	H	1.03	14.34	-0.34	0.08	-0.698	0.559	0.448	-0.719	0.576	0.461	13.62	0.24	0.54	1.03		
	I	0.96	13.71	-0.96	0.29	0.492	0.780	-0.387	0.472	0.749	-0.372	14.18	-0.21	-0.08	0.96		
BrG	A	1.26	68.77	-30.78	-5.01	0.996	-0.093	-0.020	1.255	-0.117	-0.025	70.02	-30.90	-5.04	1.26		
	B	2.40	68.59	-30.89	-5.18	0.020	0.999	-0.042	0.048	2.398	-0.101	68.64	-28.49	-5.28	2.40		
	C	1.78	68.40	-30	-5.07	-0.050	0.465	0.884	-0.089	0.828	1.574	68.31	-30.06	-3.50	1.78		
	F	1.32	68.42	-30.65	-5.26	0.548	0.679	0.490	0.723	0.896	0.647	69.14	-29.75	-4.61	1.32		
	G	1.66	69.00	-30.75	-4.85	0.614	-0.451	0.648	1.019	-0.749	1.076	70.02	-31.50	-3.77	1.66		
	H	1.68	68.70	-30.57	-4.91	-0.491	0.748	0.446	-0.825	1.257	0.749	67.88	-29.31	-4.16	1.68		
	I	1.47	68.96	-30.64	-4.91	0.544	0.315	-0.778	0.800	0.463	-1.144	69.76	-30.18	-6.05	1.47		

表 7.1.4 DUPON-DATASET の試験色色差対の基準色及び閾値推定値

色	種類	閾値	基準色			色差方向			色差成分			閾値推定色			推定色差 dE
			T50	L*(S)	a*(S)	b*(S)	dl*	da*	db*	T50 × dL*	T50 × da*	T50 × db*	L*(T)	a*(T)	b*(T)
m.rBr	A	1.06	28.89	21.19	17.64	0.994	0.025	0.108	1.054	0.027	0.114	29.94	21.22	17.75	1.06
	B	1.17	28.84	20.83	17.65	0.025	0.996	0.089	0.029	1.165	0.104	28.87	22.00	17.75	1.17
	C	1.53	28.92	21.10	17.80	0.023	-0.067	0.998	0.035	-0.103	1.527	28.96	21.00	19.33	1.53
	F	1.11	28.73	21.12	17.68	0.592	0.526	0.610	0.657	0.584	0.677	29.39	21.70	18.36	1.11
	G	0.97	29.17	21.25	17.98	0.580	-0.601	0.550	0.563	-0.583	0.534	29.73	20.67	18.51	0.97
	H	1.39	29.01	21.28	17.89	-0.659	0.564	0.498	-0.916	0.784	0.692	28.09	22.06	18.58	1.39
	I	0.95	28.69	21.08	17.99	0.625	0.659	-0.419	0.594	0.626	-0.398	29.28	21.71	17.59	0.95
dk.bG	A	1.08	32.26	-33.20	-5.07	0.946	0.323	0.019	1.022	0.349	0.021	33.28	-32.85	-5.05	1.08
	B	3.65	31.59	-33.43	-4.95	-0.053	0.992	-0.113	-0.193	3.621	-0.412	31.40	-29.81	-5.36	3.65
	C	1.43	31.60	-33.50	-5.02	0.004	0.452	0.892	0.006	0.646	1.276	31.61	-32.85	-3.74	1.43
	F	2.28	31.54	-33.57	-5.13	0.336	0.891	0.307	0.766	2.0	0.700	32.31	-31.54	-4.43	2.28
	G	1.37	31.31	-34.00	-5.02	0.600	-0.403	0.691	0.822	-0.552	0.947	32.13	-34.55	-4.07	1.37
	H	1.51	31.39	-34.11	-4.88	-0.519	0.781	0.348	-0.784	1.179	0.525	30.61	-32.93	-4.35	1.51
	I	1.18	31.80	-34.13	-4.88	0.489	0.667	-0.562	0.577	0.787	-0.663	32.38	-33.34	-5.54	1.18
br.gB	A	1.22	59.95	-13.71	-25.84	0.990	0.128	-0.051	1.208	0.156	-0.062	61.16	-13.55	-25.90	1.22
	B	1.69	59.29	-13.79	-26.98	-0.152	0.969	0.197	-0.257	1.638	0.333	59.03	-12.15	-26.65	1.69
	C	2.07	59.99	-13.09	-25.82	-0.170	0.244	0.955	-0.352	0.505	1.977	59.64	-12.58	-23.84	2.07
	F	0.99	59.51	-13.54	-25.82	0.589	0.688	0.425	0.583	0.681	0.421	60.09	-12.86	-25.40	0.99
	G	1.67	60.21	-13.24	-25.56	0	-0.478	0.729	0.818	-0.798	1.217	61.03	-14.04	-24.34	1.67
	H	1.36	60.54	-13.24	-25.56	-0.672	-0.592	0.446	-0.914	0.805	0.607	59.63	-12.43	-24.95	1.36
	I	2.18	59.84	-13.47	-25.70	0.513	0.495	-0.701	1.118	1.079	-1.528	60.96	-12.39	-27.23	2.18
vdk.R	A	1.08	18.24	25.93	3.26	0.983	0.167	-0.079	1.062	0.180	-0.085	19.30	26.11	3.17	1.08
	B	1.75	17.33	25.07	3.29	-0.513	0.857	0.042	-0.898	1.500	0.074	16.43	26.57	3.36	1.75
	C	1.66	16.99	25.03	3.83	0.109	0.084	0.991	0.181	0.139	1.645	17.17	25.17	5.48	1.66
	F	1.42	18.13	26.02	3.59	0.615	0.589	0.524	0.873	0.836	0.744	19.00	26.86	4.33	1.42
	G	1.66	18.10	25.77	3.35	0.692	-0.464	0.553	1.149	-0.770	0.918	19.25	25.00	4.27	1.66
	H	1.81	16.21	24.30	3.16	0.016	0.786	0.618	0.029	1.423	1.119	16.24	25.72	4.28	1.81
	I	1.36	16.50	24.54	3.38	0.448	0.602	-0.662	0.609	0.819	-0.900	17.11	25.36	2.48	1.36
m.pPk	A	1.35	58.42	31.06	-0.16	0.965	0.020	0.260	1.303	0.027	0.351	59.72	31.09	0.19	1.35
	B	2.39	58.13	31.59	-0.39	-0.008	0.999	0.044	-0.019	2.388	0.105	58.11	33.98	-0.28	2.39
	C	1.95	58.06	31.69	-0.22	-0.178	0.293	0.939	-0.347	0.571	1.831	57.71	32.26	1.61	1.95
	F	1.67	58.18	31.35	-0.35	0.535	0.628	0.566	0.893	1.049	0.945	59.07	32.40	0.60	1.67
	G	1.57	57.58	32.00	0.28	0.671	-0.435	0.600	1.053	-0.683	0.942	58.63	31.32	1.22	1.57
	H	1.58	58.14	31.60	-0.23	-0.700	0.555	0.449	-1.106	0.877	0.709	57.03	32.48	0.48	1.58
	I	1.69	58.25	31.27	-0.21	0.717	0.512	-0.472	1.212	0.865	-0.798	59.46	32.14	-1.01	1.69

表 7.1.5 DUPON-DATASET の試験色色差対の基準色及び閾値推定値

色	種類	閾値 T50	基準色			色差方向			色差成分			閾値推定色			推定色差 dE
			L*(S)	a*(S)	b*(S)	dL*	da*	db*	T50 × dL*	T50 × da*	T50 × db*	L*(T)	a*(T)	b*(T)	
dk.B	A	1.02	30.13	6.62	-30.84	0.998	-0.009	0.071	1.018	-0.009	0.072	31.15	6.61	-30.77	1.02
	B	1.41	30.40	7.23	-31.66	0.061	0.974	-0.220	-0.086	1.373	-0.310	30.31	8.60	-31.97	1.41
	C	1.18	30.13	6.61	-30.75	-0.114	0.254	0.961	-0.135	0.300	1.134	30.00	6.91	-29.62	1.18
	F	0.99	30.24	6.87	-31.58	0.398	0.848	0.350	0.394	0.840	0.347	30.63	7.71	-31.23	0.99
	G	1.74	30.38	6.88	-31.37	0.578	-0.532	0.619	1.006	-0.926	1.077	31.39	5.95	-30.29	1.74
	H	1.07	29.93	6.79	-30.81	-0.598	0.790	0.139	-0.640	0.845	0.149	29.29	7.64	-30.66	1.07
	I	1.75	30.09	6.78	-31.01	0.565	0.577	-0.590	0.989	1.010	-1.033	31.08	7.79	-32.04	1.75
	It.Gy	A	1.30	83.38	0.06	0.13	0.985	-0.156	0.075	1.281	-0.203	0.098	84.66	-0.14	0.23
st.OY	B	1.02	84.67	-0.04	0.72	-0.031	0.998	-0.061	-0.032	1.018	-0.062	84.64	0.98	0.66	1.02
	C	1.81	82.69	1.24	0.66	0.303	-0.475	0.826	0.548	-0.860	1.495	83.24	0.38	2.16	1.81
	F	1.26	83.89	-0.35	-0.24	0.557	0.629	0.542	0.702	0.793	0.683	84.59	0.44	0.44	1.26
	G	1.36	83.92	1.02	0.00	0.524	-0.631	0.572	0.713	-0.858	0.778	84.63	0.16	0.78	1.36
	H	1.01	83.43	0.96	0.16	-0.491	0.806	0.329	-0.496	0.814	0.332	82.93	1.77	0.49	1.01
	I	1.56	82.39	-0.74	0.07	0.866	0.079	-0.495	1.351	0.123	-0.772	83.74	-0.62	-0.70	1.56
	A	1.63	75.90	18.00	79.70	0.969	0.245	-0.044	1.579	0.399	-0.072	77.48	18.40	79.63	1.63
	B	1.89	76.11	18.21	79.89	-0.069	0.997	-0.046	-0.130	1.884	-0.087	75.98	20.09	79.80	1.89
st.OY	C	4.41	76.19	18.09	79.85	0.012	-0.045	0.999	0.053	-0.198	4.406	76.24	17.89	84.26	4.41
	F	2.11	76.17	18.26	80.01	0.429	0.763	0.485	0.905	1.610	1.023	77.08	19.87	81.03	2.11
	G	2.10	76.10	18.35	79.81	0.579	-0.437	0.688	1.216	-0.918	1.445	77.32	17.43	81.25	2.10
	H	1.79	75.84	18.44	80.11	-0.593	0.532	0.605	-1.061	0.952	1.083	74.78	19.39	81.19	1.79
	I	2.12	76.09	18.23	79.89	0.371	0.728	-0.577	0.787	1.543	-1.223	76.88	19.77	79.67	2.12

7. 3 ICD-DATASETによる性能試験

DUPON-DATASETは、参照色差対と試験色差対の知覚色差の大小を比較して同じ大きさに知覚される色差を求めたデータであるが、製品色の色彩管理では、色差の違いを識別できるかどうかだけでなく、ある一定以上の大きさの色差が許容されるかどうかが問題となることが多い。製品色の色合わせでは、目標色（指定色）と完全に等色した色に仕上げることが難しく、色差の違いが識別できる閾値上の色になることが一般的である。目標色との色差が製品として許容できるかどうかは、製品として出荷した際の色のクレームの発生と密接に関係する。色差が大きすぎれば色違いのクレームによる損失が増加し、色差を厳しく管理すれば製造コストが増加することになる。このため、ISO9000シリーズで知られている品質システムにおいても、製品として許容できる色差をどのように設定するか、どのように検査・管理するかが問題となる。ICD-DATASET⁷⁾は、陶磁器タイル製造工業で多く利用されている低彩度領域の7色を中心色（以下、基準色という。）とする247種類の色差対を用いて、「色差を感じることができるかどうか（以下、識別色差という）」及び「製品として許容できる色差かどうか（以下、許容色差という）」を判定したもので、観測者は48名である。

基準色は、A: 5.0R 8/2、B: 7.5YR 8/2、C: 7.5YR 8/4、D: 5.0YR 6/2、E: 5.0G 8/2、F: 10.0B 8/2及びG:N7.5である。基準色と組み合わせる周辺色は、図7.5のように基準色を中心にメトリック色相差、メトリック明度差、及びメトリッククロマ差が約 $\Delta E^* = 2.0$ の範囲で少しづつ色差が変化するようになっている。

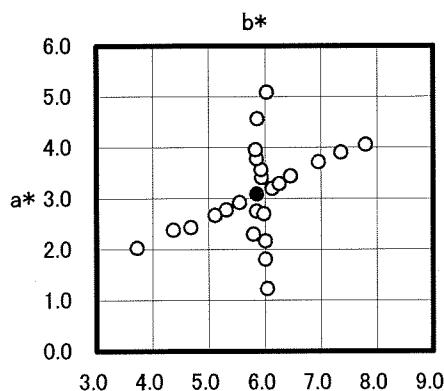


図 7.5 基準色 A:5.0R 8/2 の中心色 (●) 及び周辺色 (○)

色差対の構成は、 $L^*=70$ で大きさが $18\text{ cm} \times 14\text{ cm}$ の灰色背景上に、 $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ の2色の色を隣接併置して配置したものである。隣接配置された2色は、ほぼ視角 10° の大きさに相当する。観測者の判定結果から、識別色差及び許容色差は、次の手順で求める。

(1) 観測者は、色比較用 D_{65} 蛍光ランプ⁸⁾で照明された色差対を観測し、その知覚される色差を次のカテゴリーのいずれに相当するかを判定する。

a) 識別色差のカテゴリー

- A: 色差を感じることができない
- B: どちらでもない
- C: 色差がはっきり感じられる

b) 許容色差のカテゴリー

- A: 製品として許容できる
- B: どちらでもない
- C: 製品として許容できない

(2) カテゴリーBの判定をカテゴリーA及びカテゴリーCに等分に振り分け、観測者48名のカテゴリーA及びカテゴリーCに対する判断確率 P を求める。

3) カテゴリーA及びカテゴリーCの判断確率曲線から、品質管理を想定した実用的な許容色差を推定する。

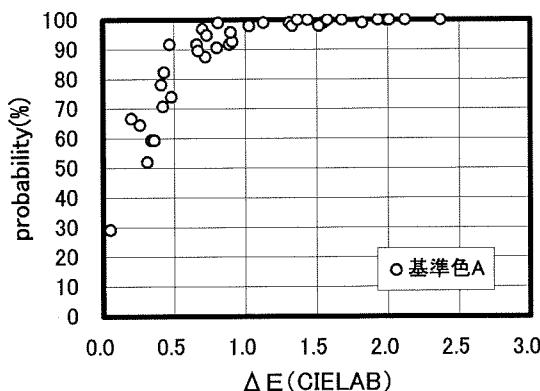


図 7.6 識別色差の判断確率

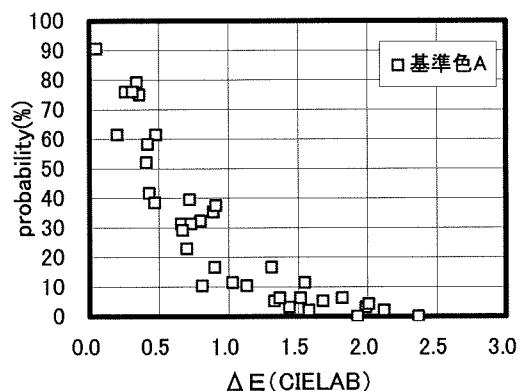


図 7.7 許容色差の判断確率

識別色差及び許容色差のカテゴリーに「どちらでもない」を採用した理由は観測者の判定におけるストレスを軽減して、観測を容易にするためである。カテゴリーBの判定がカテゴリーA及びカテゴリーCになる確率を $P=0.5$ ($P=50\%$)と仮定して、カテゴリーA及びカテゴリーCに振り分けて、一対比較のデータとして

処理する。このように処理して得られた判断確率は図 7.6 及び図 7.7 のようになる。図 7.6 及び図 7.7 は、基準色 A の結果である。

一般に、図 7.6 及び図 7.7 のように、識別できる判断確率が大きくなると、許容できる判断確率は小さくなる。この点を考慮して、識別色差と許容色差の関係を見るために、許容色差の判断確率そのものではなく、 $P=100\% \text{ (} P=100\% \text{) } \rightarrow \text{許容色差の判断確率を引いた値}$ を用いて、識別色差と許容色差の関係を示すと図 7.8 のようになる。両者の間には、有意な相関関係が認めらる。その関係は図 7.8 に示した指數関数で近似することができる。図 7.8 の横軸で示した識別色差の閾値に相当する 50% の判断確率における許容できない確率は約 20%（許容できる確率は約 80%）に相当する。逆に、縦軸で示した許容色差の閾値に相当する 50% の判断確率における識別できる確率は約 80% に相当する。この関係は、製品として許容できるかどうかの確率は、識別色差の閾値より色差が大きくなると、急激に低下することを示している。許容色差の判断基準が、識別色差を基準として閾値上どの程度までなら許容できるかを目安にしていることが推定される。

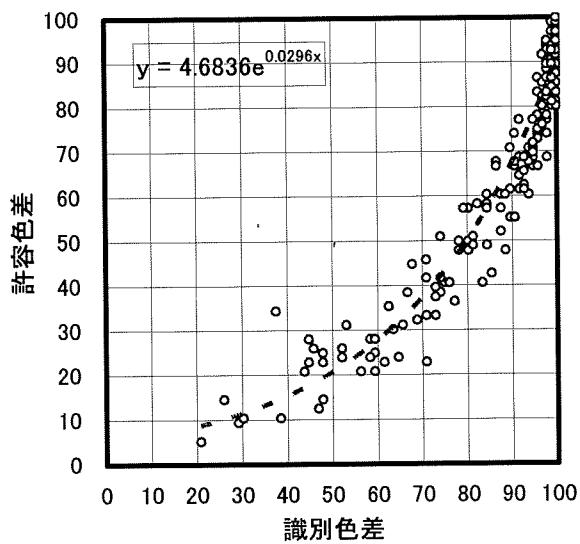


図 7.8 識別色差と許容色差の関係

恒常法では、識別色差及び許容色差の判断確率から、正規補間法や最小 2 乗法などを適用することによってメジアン又は平均値から閾値を推定⁹⁾する。図 7.8 に示すような識別色差と許容色差の関係が反映されないで、個別に閾値が求められる。しかし、品質システムにおける製品コストを考慮した品質基準の設定という面では、識別色差の判断確率が大きくなるにつれて許容色差の判断確率が小さくなるという関係から得られる判断確率の平衡点又は分岐点を、品質管理（色彩

管理) の基準とすることが実用的と考えられる。具体的には、図 7.6 と図 7.7 の判断確率曲線が交差する点に相当する色差を、実用的な閾値とすることを意味する。

基準色 A を例題にして、正規補間法で用いる標準測度値 (Z 値) と色差の関係を図 7.9 に示す。また、識別色差の判断確率 (以下、識別確率曲線という。) と許容色差の判断確率 (以下、許容確率曲線という。) の平衡点を図 7.10 に示す。

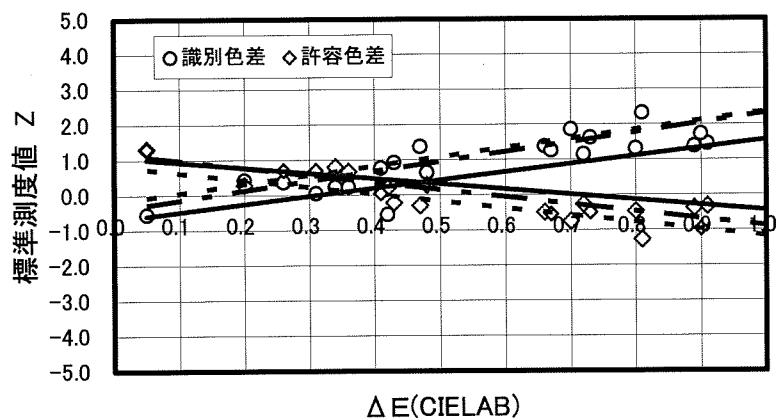


図 7.9 正規補間法による色差属性別の識別色差と許容色差の関係

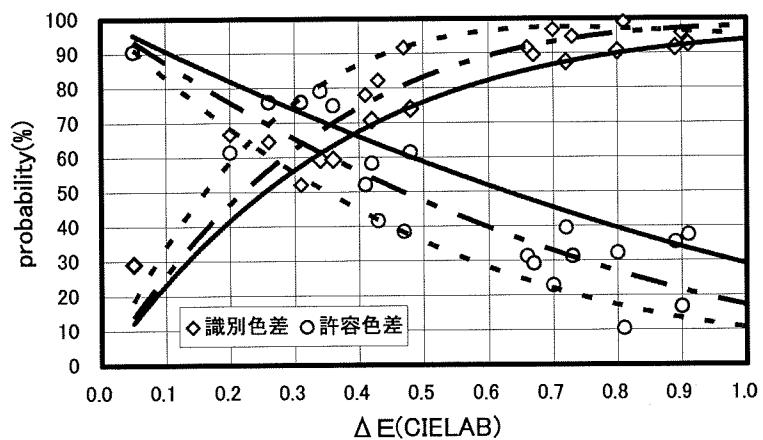


図 7.10 色差属性別の識別色差確率曲線と許容色差確率曲線の平衡点

図 7.9 及び図 7.10 の回帰式で、実線は CIELAB のメトリック色相差、破線はメトリック明度差及び一点鎖線はメトリック彩度差の結果を示す。図 7.10 の回帰式は、回帰分析の結果から、識別色差では回帰式の近似の程度が良好であった 4 次の多項式である。同様に、許容色差では 3 次の多項式であり、予測結果の比較に用いる 8 種類の色差式に対する決定係数は、無彩色 N7.5 を除いた有彩色 6 色すべての色差属性に対して $R^2=0.8\sim0.99$ の範囲にあり、良好な近似が得られている。

正規補間法による閾値は $Z=0$ の色差に相当する。図 7.9 から $Z=0$ の色差を求めると、識別色差は $\Delta E_H=0.31$ 、 $\Delta E_V=0.08$ 及び $\Delta E_C=0.15$ が得られる。また、許容色差は $\Delta E_H=0.71$ 、 $\Delta E_V=0.42$ 及び $\Delta E_C=0.57$ が得られる。このように個別に得られる閾値からは、識別色差と許容色差の関係を推定することができない。

一方、図 7.10 の識別確率曲線と許容確率曲線の平衡点から、 $\Delta E_H=0.39$ 、 $\Delta E_V=0.23$ 及び $\Delta E_C=0.31$ が得られる。また、このときの識別色差の判断確率として $P_H=66.70\%$ 、 $P_V=64.30\%$ 及び $P_C=64.08\%$ が得られる。この結果は、色の差を識別できる確率が約 65% を超えると、色の差を許容できない確率が低下し、製品色のクレームが発生する確率が高くなることを意味している。この判断の転換点の色差が平衡点の色差である。また、平衡点の色差は、正規補間法から得られる識別色差及び許容色差の間にあり、極限法でいう主観的な等価値に似た性質をもっている。識別確率曲線と許容確率曲線の平衡点は、正規補間法から得られる閾値を反映するとともに、許容色差の判断基準と関係していることから、色彩管理の基準として有効と考えられる。なお、識別色差と許容色差の関係については、後で詳述する。

識別確率曲線と許容確率曲線の回帰式の交点から得られる色差値を閾値上の実用色差として、CIELAB、CIE94、CIEDE2000、CMC(1:1)、MLAB、NCDF、NCDF-1、及び NCDF-2 の 8 種類の色差式を用いて、247 種類の色差対の色差を計算し、識別確率曲線と許容確率曲線の回帰式を求め、両者の回帰式の交点である実用色差を求めた結果を表 7.5 に示す。表 7.5 には、判断確率曲線の傾向が他の基準色の結果と著しく異なる基準色 A の色相差の結果及び色差属性ごとに分類が難しい基準色 G の結果を除いてある。

知覚色差を良好に予測できる色差式には、7.2 節に述べたように、色の種類及び色差属性別に色差値の変動や偏りが少ないことが求められる。この指標として、表 7.5 には、色差式ごとに色差属性別の平均値 (M)、標準偏差 (S)、標準偏差の平均値に対する比率 (S/M)、及び明度差の平均値と色相差並びに彩度差の平均値との比率 (H/V 及び C/V) を示した。また、表 7.5 には、全色差対の判断確率曲線から求めた閾値である全体 (T) を、あわせて示した。表 7.5 の T の大きさは

色差式によって違いが見られる。このため、色差式の違いを直接比較できないので、平均値の違いによる影響を除くために、 T の大きさで規準化した値を用いる。その結果を表 7.6 に示す。

表 7.6 の S/M の値から、色の違いによる知覚色差との一致性を比較した結果を次に示す。表 7.6 の S/M の値を図 7.11 に示す。メトリック色相差については CIE94 < CIELAB < MLAB < NCDF = CIEDE2000 < CMC < NCDF-2 < NCDF-1 の順に S/M が小さくなっている。メトリック明度差については CIEDE2000 < CMC < CIE94 = NCDF = NCDF-1 = NCDF-2 < MLAB < CIELAB の順に S/M が小さくなる。

メトリック彩度差については CIEDE2000 = CIELAB = CMC < CIE94 < NCDF < NCDF-2 < NCDF-1 < MLAB の順に小さく、色の種類による変動が少なくなる。

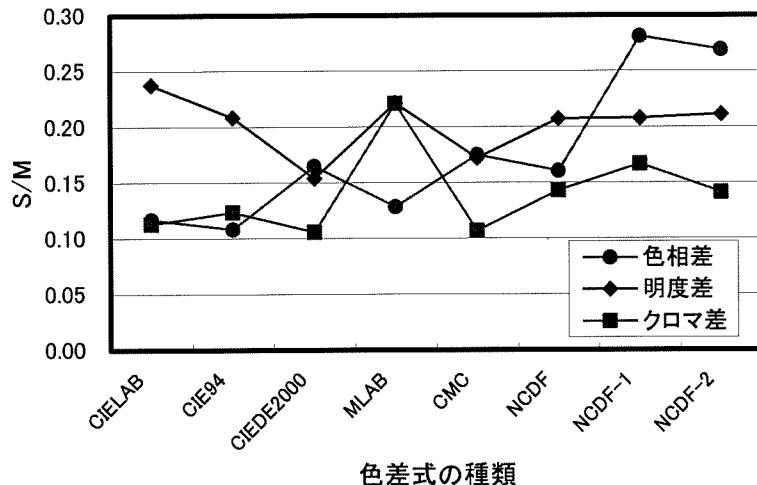


図 7.11 色差式による S/M の比較

NCDF は、CIE94 と比較するとメトリック色相差の S/M の値がやや大きいものの、全体的な傾向としては、CIE94 と同等な、知覚色差との一致性が得られている。しかし、NCDF-1 及び NCDF-2 では、特定の色（表中に網かけした数値で示す。）の S/M の値が他に比して大きくなることがあり、無彩色点補正の歪みがあることが推定される。

また、CIE94 と CIEDE2000 のメトリック明度差の比較では、CIEDE2000 が小さな値になっている。CIE94 では採用していない明度指数 L^* の関数としての重み付け係数の効果が現れている。同様の傾向は、明度指数 L^* の関数としての重み付け係数を採用している CMC にも見ることができる。

また、CIEDE2000 の青領域の補正だけに適用されるローテーション係数 (RT) による補正効果が期待される基準色 F (10B 8/2) は、メトリック色相差の実用色

差が他の色に比較して相対的に大きくなり、標準偏差を大きくしている原因になっている。ローテーション係数を採用していない CIE94 の基準色 F の結果と CIEDE2000 の結果の違いに反映されている。ローテーション係数を除くと、CIEDE2000 と概ね同じ構造を持つ CMC は、基準色 F ($C^* \approx 6.6$) のように低クロマの色差対の実用色差が大きくなる傾向があるが、全体的には、CIEDE2000 とほぼ同じ結果になっている。

表 7.6 で、色差属性間の一致性の目安と考えられる H/V 及び C/V の値を比較した結果を図 7.12 に示す。MLAB は、色差式の期待値である 1.0 と、ほぼ一致した値になっている。図 7.12 から、MLAB>NCDF-1>NCDF>CIE94>NCDF-2>CIELAB>CMC>CIEDE2000 の順に一致性に優れている。MLAB では、6.2 節に述べたように、CIE が 1978 年に提案した色差式検討用の物体色 6R 4.8/8.9、10Y 8.4/6.0、4BG 5.3/6.5、7PB 3.3/8.0 を用いた比較的高彩度領域における観測データから求められた重み付け係数が採用されている。しかし、ICD-DATASET で対象としている低彩度領域における観測データについても、MLAB の結果がある程度良好であったことは、色差属性の違いによる色差知覚が、比較的高彩度の色と低彩度の色とで、ほぼ同じ比率で知覚されていることを示している。この結果は、色の種類の違いによって測色色差に対する知覚色差の大きさは変化するものの、色差属性間の比率は大きく変化しないことを意味する。

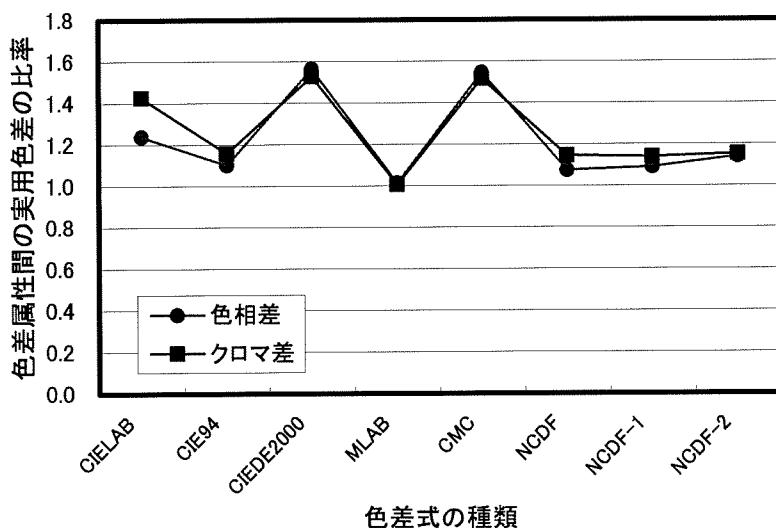


図 7.12 明度を基準として比較した色差属性間の実用色差の比率

NCDF、NCDF-1 及び NCDF-2 の H/V 及び C/V の値は約 1.1 であり、やや明度差が小さくなる傾向があるが、CIELAB に比較して色差属性による色差知覚の差

違が補正されており、6.3 節の測色色差と知覚色差との関係に基づいた式(6-6)及び式(6-7)の重み付け係数 $k(H)$ 及び $k(C)$ の有効性が認められる。これに対して、CIEDE2000 及び CMC はメトリック色相差及びメトリック彩度差の大きさが、メトリック明度差の 1.5 倍と大きく、色差属性によって、予測される色差と知覚される色差とにズレが生じることを示している。7.2 節の DUPON-DATASET の結果と比較すると、低彩度領域におけるメトリック明度差、メトリック色相差及びメトリック彩度差の補正のバランスに問題があるといえる。

色差属性別ではなく、基準色ごとに識別確率曲線と許容確率曲線との平衡点を求めた結果を表 7.7 及び図 7.13 に示す。表 7.7 には基準色 G のデータが含まれている。表 7.5 と同様に、S/M の値を比較すると、CIELAB < MLAB < NCDF-1 < CIE94 < NCDF < NCDF-2 < CIEDE2000 < CMC の順に、色の種類による変動が少ない結果になっている。CIEDE2000 及び CMC は基準色 G の実用色差が大きく、低彩度領域の色の中でも、特に、無彩色近傍での重み付け関数の補正効果に問題があることがわかる。CIELAB は 7 色の変動が最も小さく、平均的な色差知覚と相關することを示しているが、表 3.2 のアンケート結果や表 7.5 及び図 7.12 の色差属性間の比較から明らかなように、色差属性間の補正が必要になる。

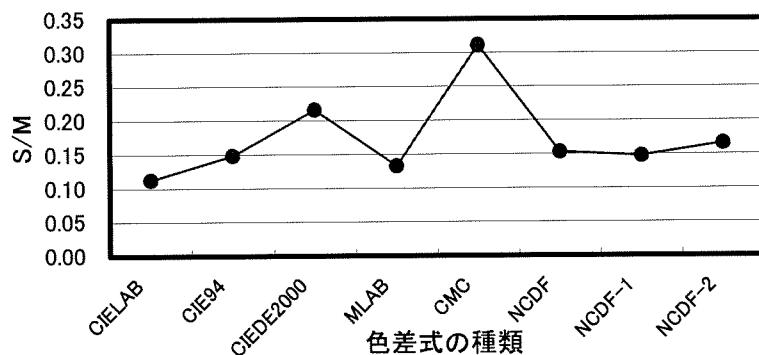


図 7.13 色別の実用色差（閾値）の比較

表 7.7 ICD-DATASET の色別の閾値を用いた色差式の性能比較結果

色	CIELAB	CIE94	CIEDE2000	MLAB	CMC	NCDF	NCDF-1	NCDF-2
A	0.32	0.27	0.26	0.22	0.28	0.30	0.27	0.30
B	0.29	0.23	0.23	0.21	0.24	0.22	0.21	0.22
C	0.34	0.26	0.23	0.27	0.24	0.25	0.24	0.24
D	0.28	0.24	0.25	0.22	0.25	0.23	0.22	0.23
E	0.38	0.32	0.27	0.29	0.29	0.31	0.30	0.33
F	0.29	0.26	0.26	0.21	0.27	0.28	0.30	0.27
G	0.34	0.34	0.40	0.24	0.50	0.33	0.23	0.22
平均値:M	0.32	0.27	0.27	0.24	0.30	0.27	0.25	0.26
標準偏差:S	0.036	0.041	0.059	0.031	0.092	0.042	0.037	0.043
S/M	0.113	0.149	0.216	0.133	0.312	0.153	0.147	0.166

表 7.5～表 7.7 の S/M 及び色差属性間の比率を比較した結果を総合すると、ICD-DATASET で対象としている低彩度領域における色差知覚に対して良好な予測を与える色差式は、CIE94>NCDF=CIELAB>MLAB>CIEDE2000>NCDF-1=CMC>NCDF-2 の順になり、DUPON-DATASET の場合と同様に、CIE94 と NCDF はともに色差知覚に対する良好な予測を与えることが明らかになった。

色差観測データに依存しない均等色差空間で、無彩色点補正を行わないで色差を計算する NCDF によって、色の種類及び色差を構成する色差属性を考慮せずに、色差知覚に相關する量を予測することが可能と考えられる。色の種類及び色差属性に関係なく、測色色差が色差知覚を良好に予測できることから、色彩管理などの産業応用では、非常に有用な色差式といえる。

識別色差と許容色差の関係について前述したが、識別確率曲線と許容確率曲線との平衡点の確率を求めた結果を表 7.8 及び図 7.14 に示す。図 7.14 から、色差式による違いは少なく、ほぼ一致しており、メトリック明度差の確率がやや低いが、色差属性間に有意な差違は認められない。平衡点の平均値は約 65% に相当し、識別確率が 50% を超える識別閾上で許容できるかどうかの判断の分岐点があることがわかる。この確率（色差としては、表 7.5 に示した値）は、多くの人が色差を知覚するものの比較的許容できる値であり、厳しい色彩管理が求められる実地応用での、管理基準を設定する際の実用色差の目安として利用できる。

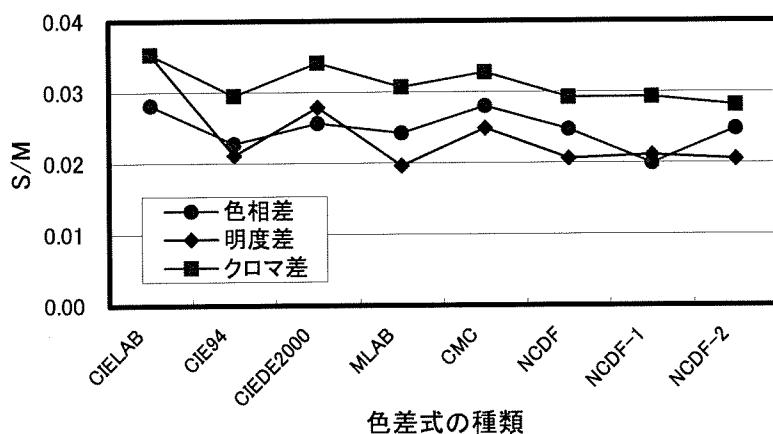


図 7.14 識別確率曲線と確率許容曲線の平衡点の S/M

表 7.5 ICD-DATASET の色差属性別の閾値を用いた色差式の性能比較結果

色	CIELAB			CIE94			CIEDE2000		
	H	V	C	H	V	C	H	V	C
A	-	0.23	0.31	-	0.23	0.24	-	0.16	0.31
B	0.28	0.26	0.33	0.23	0.23	0.24	0.26	0.19	0.24
C	0.32	0.32	0.40	0.26	0.26	0.29	0.24	0.21	0.26
D	0.32	0.18	0.38	0.26	0.18	0.29	0.32	0.16	0.28
E	0.38	0.34	0.42	0.31	0.33	0.33	0.28	0.23	0.31
F	0.30	0.22	0.37	0.27	0.22	0.29	0.36	0.17	0.31
平均値:M	0.32	0.26	0.37	0.27	0.24	0.28	0.29	0.19	0.29
標準偏差:S	0.037	0.061	0.042	0.029	0.050	0.035	0.048	0.029	0.030
S/M	0.12	0.24	0.11	0.11	0.21	0.12	0.16	0.15	0.11
全体:T	0.32			0.27			0.25		
H/V	1.24			1.10			1.56		
C/V	1.43			1.16			1.53		

色	MLAB			CMC			NCDF		
	H	V	C	H	V	C	H	V	C
A	-	0.22	0.17	-	0.18	0.30	-	0.23	0.26
B	0.20	0.22	0.21	0.26	0.20	0.26	0.21	0.22	0.22
C	0.26	0.26	0.30	0.24	0.22	0.27	0.25	0.25	0.27
D	0.23	0.18	0.24	0.31	0.16	0.30	0.23	0.18	0.26
E	0.28	0.33	0.30	0.35	0.25	0.31	0.31	0.33	0.31
F	0.23	0.21	0.21	0.36	0.17	0.35	0.29	0.23	0.33
平均値:M	0.24	0.24	0.24	0.30	0.20	0.30	0.26	0.24	0.28
標準偏差:S	0.031	0.052	0.053	0.053	0.034	0.032	0.041	0.050	0.039
S/M	0.13	0.22	0.22	0.17	0.17	0.11	0.16	0.21	0.14
全体:T	0.24			0.26			0.27		
H/V	1.01			1.55			1.08		
C/V	1.01			1.52			1.15		

色	NCDF-1			NCDF-2		
	H	V	C	H	V	C
A	-	0.23	0.25	-	0.23	0.27
B	0.19	0.22	0.21	0.22	0.22	0.22
C	0.24	0.24	0.26	0.25	0.25	0.26
D	0.22	0.18	0.26	0.23	0.18	0.26
E	0.27	0.33	0.32	0.40	0.33	0.32
F	0.38	0.23	0.33	0.26	0.22	0.32
平均値:M	0.26	0.24	0.27	0.27	0.24	0.28
標準偏差:S	0.073	0.050	0.045	0.073	0.050	0.039
S/M	0.28	0.21	0.17	0.27	0.21	0.14
全体:T	0.25			0.26		
H/V	1.09			1.14		
C/V	1.14			1.15		

表 7.6 ICD-DATASET の色差式の性能比較結果（総合色差で規準化した場合）

色	CIELAB			CIE94			CIEDE2000		
	H	V	C	H	V	C	H	V	C
A		0.73	0.98		0.86	0.90		0.63	1.23
B	0.88	0.82	1.04	0.86	0.86	0.90	1.03	0.75	0.95
C	1.01	1.01	1.26	0.98	0.98	1.09	0.95	0.83	1.03
D	1.01	0.57	1.20	0.98	0.68	1.09	1.27	0.63	1.11
E	1.20	1.07	1.32	1.17	1.24	1.24	1.11	0.91	1.23
F	0.95	0.69	1.17	1.02	0.83	1.09	1.43	0.67	1.23
平均値:M	1.01	0.81	1.16	1.00	0.91	1.05	1.16	0.74	1.13
標準偏差:S	0.118	0.194	0.131	0.108	0.189	0.130	0.191	0.114	0.120
S/M	0.117	0.238	0.113	0.108	0.208	0.124	0.165	0.154	0.106
全体:T	0.32			0.27			0.25		
H/V	1.24			1.10			1.56		
C/V	1.43			1.16			1.53		

色	MLAB			CMC			NCDF		
	H	V	C	H	V	C	H	V	C
A		0.93	0.72		0.68	1.14		0.86	0.97
B	0.85	0.93	0.89	0.98	0.76	0.98	0.79	0.82	0.82
C	1.10	1.10	1.27	0.91	0.83	1.02	0.94	0.94	1.01
D	0.97	0.76	1.02	1.17	0.61	1.14	0.86	0.67	0.97
E	1.19	1.40	1.27	1.33	0.95	1.17	1.16	1.24	1.16
F	0.97	0.89	0.89	1.36	0.64	1.33	1.09	0.86	1.24
平均値:M	1.02	1.00	1.01	1.15	0.74	1.13	0.97	0.90	1.03
標準偏差:S	0.131	0.222	0.223	0.202	0.128	0.121	0.155	0.187	0.147
S/M	0.128	0.221	0.221	0.175	0.172	0.107	0.161	0.207	0.143
全体:T	0.24			0.26			0.27		
H/V	1.01			1.55			1.08		
C/V	1.01			1.52			1.15		

色	NCDF-1			NCDF-2		
	H	V	C	H	V	C
A		0.92	1.00		0.89	1.04
B	0.76	0.88	0.84	0.85	0.85	0.85
C	0.96	0.96	1.04	0.97	0.97	1.00
D	0.88	0.72	1.04	0.89	0.69	1.00
E	1.08	1.33	1.29	1.54	1.27	1.24
F	1.53	0.92	1.33	1.00	0.85	1.24
平均値:M	1.04	0.96	1.09	1.05	0.92	1.06
標準偏差:S	0.294	0.199	0.182	0.283	0.194	0.150
S/M	0.281	0.208	0.167	0.269	0.211	0.141
全体:T	0.25			0.26		
H/V	1.09			1.14		
C/V	1.14			1.15		

表 7.8 ICD-DATASET の色差属性別の識別色差と許容色差の平衡点の判断確率

色	CIELAB			CIE94			CIEDE2000		
	H	V	C	H	V	C	H	V	C
A	—	64.30	64.08	—	64.43	63.90	—	63.94	63.82
B	68.40	60.37	68.36	68.01	61.38	67.63	68.33	59.67	68.28
C	66.38	61.68	67.65	65.74	62.39	65.76	66.65	61.52	66.83
D	64.39	63.56	66.28	65.17	63.42	65.10	65.28	63.33	65.51
E	64.16	60.69	64.72	64.44	60.81	64.04	64.34	60.68	64.62
F	64.33	62.23	62.22	64.35	62.45	62.00	64.44	60.31	62.00
平均値:M	65.53	62.14	65.55	65.54	62.48	64.74	65.81	61.58	65.18
標準偏差:S	1.842	1.558	2.314	1.492	1.319	1.909	1.686	1.715	2.223
S/M	0.028	0.025	0.035	0.023	0.021	0.029	0.026	0.028	0.034
H/V	1.05			1.05			1.07		
C/V	1.05			1.04			1.06		

色	MLAB			CMC			NCDF		
	H	V	C	H	V	C	H	V	C
A	—	64.52	63.79	—	64.14	64.12	—	64.38	63.85
B	68.04	62.12	67.26	68.90	59.98	68.34	67.96	61.81	67.32
C	65.87	62.35	65.82	66.36	61.62	66.74	65.74	62.56	65.82
D	65.08	63.41	64.88	65.48	63.00	66.04	64.93	63.39	64.98
E	64.60	60.88	64.18	64.29	60.70	64.64	64.55	60.82	64.07
F	63.92	62.62	61.41	64.62	61.20	62.26	63.72	61.66	61.78
平均値:M	65.50	62.65	64.56	65.93	61.77	65.36	65.38	62.44	64.64
標準偏差:S	1.587	1.231	1.982	1.845	1.538	2.141	1.615	1.289	1.888
S/M	0.024	0.020	0.031	0.028	0.025	0.033	0.025	0.021	0.029
H/V	1.05			1.07			1.05		
C/V	1.03			1.06			1.04		

色	NCDF-1			NCDF-2		
	H	V	C	H	V	C
A	—	64.39	63.87	—	64.51	64.13
B	67.65	62.02	67.35	67.81	62.06	67.43
C	65.99	62.62	65.57	65.93	62.53	65.51
D	64.83	63.43	64.98	65.13	63.39	64.97
E	64.94	60.80	63.99	64.58	60.80	64.15
F	64.39	61.43	61.71	63.48	61.93	61.92
平均値:M	65.56	62.45	64.58	65.39	62.54	64.69
標準偏差:S	1.308	1.319	1.892	1.622	1.283	1.819
S/M	0.020	0.021	0.029	0.025	0.021	0.028
H/V	1.05			1.05		
C/V	1.03			1.03		

7. 4 WITT-DATASETによる性能試験

WITT-DATASET¹⁰⁾は、CIELABが1978年に勧告した色差研究のためのガイドライン²⁾で示した物体色5色（図6.1に示す赤、黄、緑、青及び灰色）を中心色として、色差属性方向に変化する周辺色30色を作成し、中心色を含めた31色を組み合わせて試験色差対を作成している。色差知覚の評価は、参照色差対を基準とした比率評定法を用いている。参照色差対は、明度だけが変化しているグレースケールで、 $\Delta L^*=0.88$ を用いたデータが報告されている。観測者は、27名である。図7.15に赤（●）を中心色とする色相及びクロマ方向に変化する周辺色の色度分布を示す。

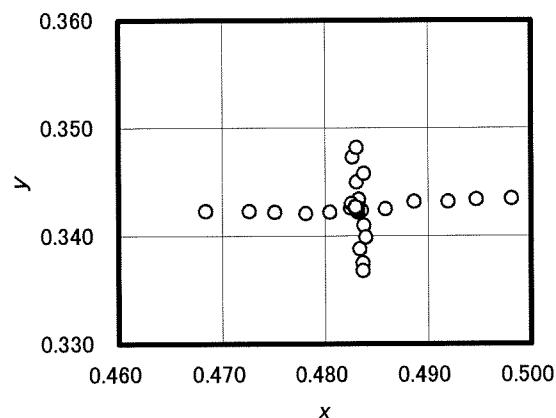


図7.15 赤を中心色（●）とする周辺色の色度分布

表7.9に、参照色差対の色差知覚の大きさを基準として、試験色差対の色差知覚を比率で評価した結果を示す。表7.9は赤を中心色とする例である。表7.9のVは判断比率を、VEは判断比率から式(7-1)によって計算される試験色差対の知覚色差を示す。また、測色値は図7.15に対応する試験色差対の測定値である。

$$VE = (V/2) \times \Delta E_{ref} \quad (7-1)$$

ここで、VE：知覚色差

V：観測者の平均判断比率

ΔE_{ref} ：参照色差対の色差で、 $\Delta L^*=0.88$

式(7-1)でVの値を2で割っているのは、比率を判断するときに参照色差対の色差の大きさを2として比率評価をしているためである。

表 7.9 に示した赤について、知覚色差と 7 つの色差式、CIELAB、CIE94、CIEDE2000、MLAB、NCDF、NCDF-1、NCDF-2 による色差との関係を図 7.16 及び図 7.17 に示す。図中の直線及び R^2 は、回帰直線及び決定係数を示す。

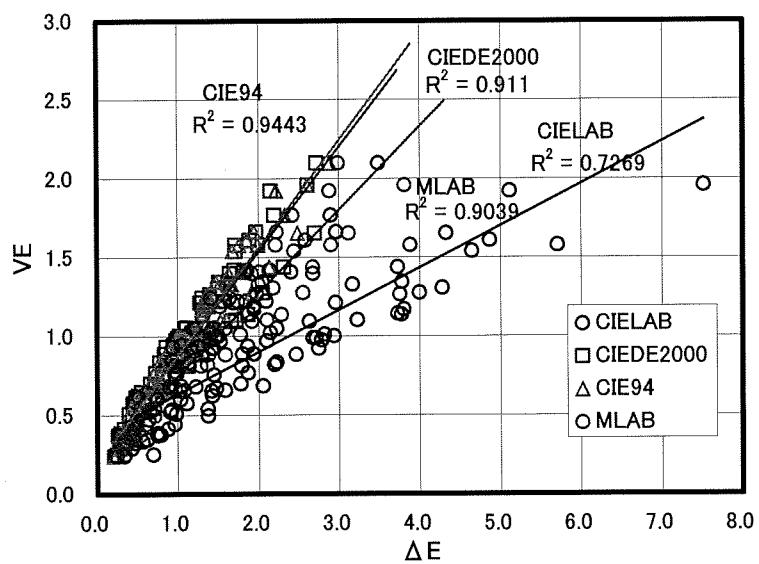


図 7.16 知覚色差と 4 種類の色差値との関係

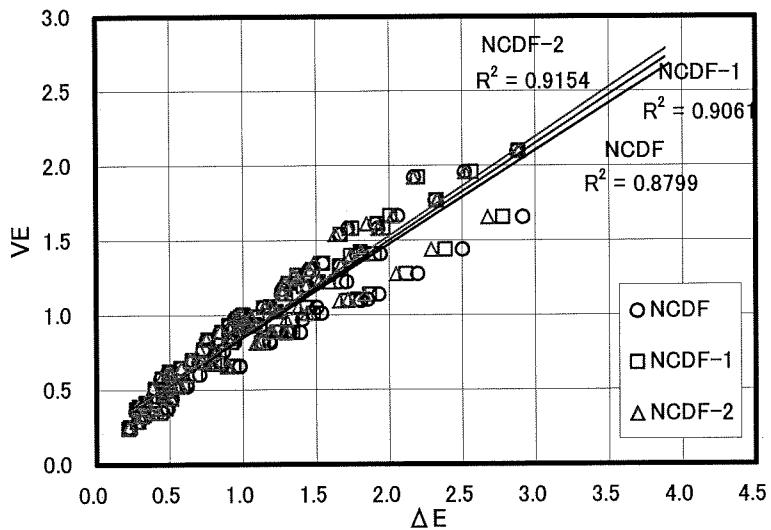


図 7.17 知覚色差と 3 種類の色差値との関係

図 7.16 及び図 7.17 から、CIELAB を除く 6 種類の色差式は、知覚色差との相関性が高く、色差知覚を良好に予測できることがわかる。赤を含めた WITT-DATASET について、測色色差と知覚色差との相関係数及び回帰式からの残差及び残差を平均値で割った値を表 7.10 及び図 7.18 に示す。残差を平均値で割ることによって規準化した理由は、色差式によって計算される色差値が異なるため残差の大きさを直接比較できないためである。

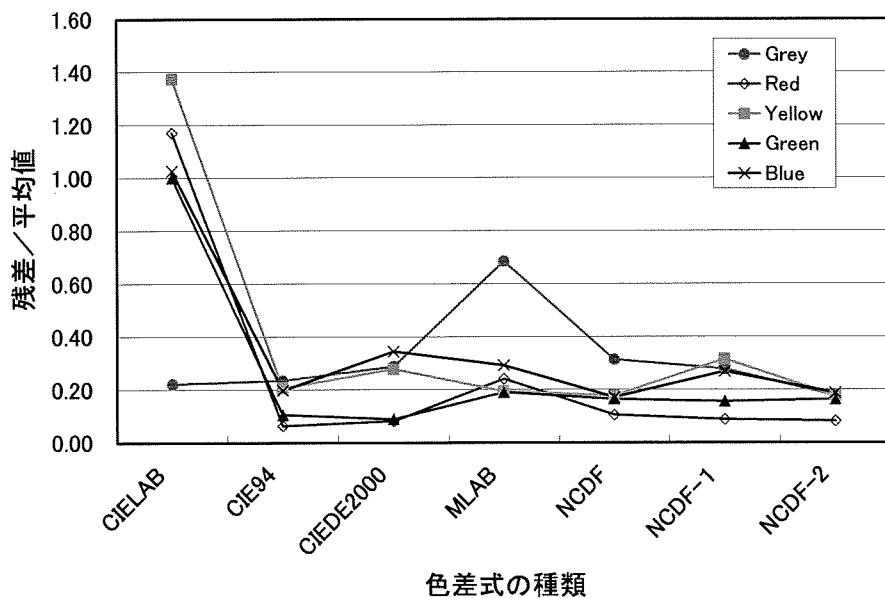


図 7.18 回帰分析による測色色差と知覚色差の間の差

表 7.10 には、図 7.18 の 5 色について、残差を平均値で規準化した値の、小さい順にランク付けした結果を示している。また、各色のランクに均等な重み付けを行って点数に置き換え、点数の合計点の小さい順にランクを付けなおした結果を総合ランクとして示した。

相関係数が 1 に近く、残差が 0 に近くなるほど知覚色差との一致性が高くなるので、表 7.10 の総合ランク及び相関係数の値から、知覚色差との一致性は、NCDF-2>CIE94>NCDF>CIEDE2000>NCDF-1>MLAB>CIELAB の順に高くなっていることがわかる。

MLAB は、WITT-DATASET の灰色を除く 4 色について、比率評定法による色差知覚と測色色差との関係から、色差属性別に重み係数を求めて補正したものである。このため、灰色についても有彩色と同じ重み係数を用いている。この結果、灰色についての測色色差が小さくなり、測色色差と知覚色差の残差が大きくなつたと考えられる。MLAB を除いた色差式で採用しているメトリッククロマの関数

として有彩色から無彩色まで、重み付け係数を連続的に変化させて、知覚色差との大きさを調整する必要があることを示している。

NCDF-1 と NCDF-2 は、CIELAB でのマンセル表色系の無彩色の偏心軸（黄緑－赤紫）と、ほぼ直交する黄と青のランクに大きな違いが見られる。NCDF-1 及び NCDF-2 では、無彩色点の位置を補正することによってメトリック色相角が変化する。このために、図 7.15 のように、中心色から色差属性別に変化させて作られた周辺色を組み合わせた試験色差対から計算される色差は、NCDF、NCDF-1 及び NCDF-2 では異なった値が得られる。このために、重み付け係数を含めた補正の有効性が異なった結果と考えられる。

また、灰色を除いた NCDF と NCDF-2 の結果は、概ね一致している。WITT-DATASET のようにクロマの大きい有彩色だけを評価する場合には、色座標が無彩色点から離れているために無彩色点近傍のデータを含めた補正ではなく、補正をしないか彩度 $C=2$ のデータによる補正で十分であることを示している。

色差知覚を予測する際に、無彩色点の偏心を補正するかどうかについては、色差観測データに用いられている色差対の色座標の位置によって、補正の有効性に違いが見られるため、今後の課題と考えられる。

表 7.10 WITT-DATASET による色差式の性能比較結果

色	統計量	色差式						
		CIELAB	CIE94	CIEDE2000	MLAB	NCDF	NCDF-1	NCDF-2
Grey	相関係数	0.880	0.883	0.861	0.877	0.790	0.834	0.833
	残差	0.26	0.27	0.32	0.59	0.37	0.32	0.23
	残差/平均値	0.222	0.235	0.288	0.686	0.314	0.278	0.177
	ランク	2	3	5	7	6	4	1
Red	相関係数	0.852	0.972	0.954	0.951	0.938	0.952	0.957
	残差	2.53	0.07	0.09	0.33	0.12	0.10	0.09
	残差/平均値	1.171	0.064	0.081	0.241	0.104	0.088	0.081
	ランク	7	1	2	6	5	4	2
Yellow	相関係数	0.698	0.885	0.798	0.846	0.926	0.898	0.922
	残差	3.74	0.26	0.32	0.32	0.22	0.35	0.22
	残差/平均値	1.375	0.206	0.278	0.194	0.177	0.315	0.177
	ランク	7	4	5	3	1	6	1
Green	相関係数	0.552	0.913	0.900	0.851	0.886	0.890	0.881
	残差	1.78	0.11	0.09	0.22	0.19	0.18	0.19
	残差/平均値	1.000	0.105	0.089	0.190	0.164	0.155	0.164
	ランク	7	2	1	6	4	3	4
Blue	相関係数	0.572	0.804	0.643	0.754	0.818	0.761	0.810
	残差	1.54	0.17	0.31	0.28	0.14	0.25	0.16
	残差/平均値	1.027	0.198	0.344	0.292	0.171	0.269	0.188
	ランク	7	3	6	5	1	4	2
総合ランク		7	2	4	6	3	5	1

表 7.9.1 参照色差対を基準とした試料色差対の色差知覚の判断比率と測色値

色:赤 組合せ	判断比率 V	知覚色差 VE	測色値			測色値			色差 dE(LAB)
			L*(S)	a*(S)	b*(S)	L*(T)	a*(T)	b*(T)	
0-1	0.57	0.25	44.58	36.96	23.02	44.56	37.53	23.42	0.70
0-2	1.13	0.50	44.58	36.96	23.02	44.56	37.90	24.02	1.38
0-3	1.90	0.84	44.58	36.96	23.02	44.56	38.57	24.55	2.23
0-4	2.28	1.00	44.58	36.96	23.02	44.59	39.08	25.05	2.94
0-5	2.66	1.17	44.58	36.96	23.02	44.58	39.73	25.63	3.80
0-6	0.88	0.39	44.58	36.96	23.02	44.48	36.46	22.47	0.75
0-7	1.23	0.54	44.58	36.96	23.02	44.45	35.97	22.07	1.37
0-8	1.56	0.69	44.58	36.96	23.02	44.58	35.40	21.69	2.05
0-9	2.22	0.98	44.58	36.96	23.02	44.46	34.78	21.29	2.78
0-10	2.60	1.14	44.58	36.96	23.02	44.66	34.02	20.74	3.72
1-6	1.42	0.62	44.56	37.53	23.42	44.48	36.46	22.47	1.43
2-7	2.10	0.92	44.56	37.90	24.02	44.45	35.97	22.07	2.75
3-8	2.97	1.31	44.56	38.57	24.55	44.58	35.40	21.69	4.28
4-9	3.59	1.58	44.59	39.08	25.05	44.46	34.78	21.29	5.71
5-10	4.45	1.96	44.58	39.73	25.63	44.66	34.02	20.74	7.52
0-11	0.79	0.35	44.58	36.96	23.02	44.36	37.42	22.66	0.62
0-12	1.37	0.60	44.58	36.96	23.02	44.40	37.80	22.45	1.04
0-13	1.49	0.66	44.58	36.96	23.02	44.52	38.07	22.14	1.42
0-14	2.02	0.89	44.58	36.96	23.02	44.52	38.52	21.88	1.94
0-15	2.39	1.05	44.58	36.96	23.02	44.60	38.78	21.74	2.23
0-16	0.55	0.24	44.58	36.96	23.02	44.48	36.69	23.19	0.33
0-17	1.22	0.54	44.58	36.96	23.02	44.49	36.19	23.54	0.93
0-18	1.55	0.68	44.58	36.96	23.02	44.35	36.02	23.78	1.22
0-19	1.85	0.81	44.58	36.96	23.02	44.52	35.47	24.02	1.79
0-20	2.21	0.97	44.58	36.96	23.02	44.49	35.28	24.29	2.10
11-16	1.19	0.52	44.36	37.42	22.66	44.48	36.69	23.19	0.91
12-17	2.02	0.89	44.40	37.80	22.45	44.49	36.19	23.54	1.95
13-18	2.49	1.10	44.52	38.07	22.14	44.35	36.02	23.78	2.63
14-19	3.27	1.44	44.52	38.52	21.88	44.52	35.47	24.02	3.73
15-20	3.76	1.65	44.60	38.78	21.74	44.49	35.28	24.29	4.33
0-21	0.85	0.37	44.58	36.96	23.02	44.83	37.20	23.05	0.35
0-22	1.40	0.62	44.58	36.96	23.02	45.07	37.24	23.19	0.59
0-23	2.12	0.93	44.58	36.96	23.02	45.46	37.53	23.29	1.09
0-24	2.39	1.05	44.58	36.96	23.02	45.68	37.77	23.45	1.44
0-25	2.83	1.25	44.58	36.96	23.02	45.91	37.77	23.53	1.64
0-26	0.74	0.33	44.58	36.96	23.02	44.29	36.64	22.80	0.48
0-27	1.25	0.55	44.58	36.96	23.02	44.12	36.44	22.85	0.71
0-28	1.92	0.84	44.58	36.96	23.02	43.70	36.54	22.60	1.06
0-29	2.40	1.06	44.58	36.96	23.02	43.43	36.17	22.56	1.46
0-30	2.78	1.22	44.58	36.96	23.02	43.11	36.00	22.46	1.84

表 7.9.2 参照色差対を基準とした試料色差対の色差知覚の判断比率と測色値

色:赤 組合せ	判断比率		測色値			測色値			色差 dE(LAB)
	V	VE	L*(S)	a*(S)	b*(S)	L*(T)	a*(T)	b*(T)	
21-26	1.47	0.65	44.83	37.20	23.05	44.29	36.64	22.80	0.81
22-27	2.15	0.95	45.07	37.24	23.19	44.12	36.44	22.85	1.29
23-28	3.23	1.42	45.46	37.53	23.29	43.70	36.54	22.60	2.14
24-29	4.02	1.77	45.68	37.77	23.45	43.43	36.17	22.56	2.89
25-30	4.77	2.10	45.91	37.77	23.53	43.11	36.00	22.46	3.48
1-11	0.86	0.38	44.56	37.53	23.42	44.36	37.42	22.66	0.79
2-12	1.50	0.66	44.56	37.90	24.02	44.40	37.80	22.45	1.59
3-13	2.01	0.88	44.56	38.57	24.55	44.52	38.07	22.14	2.47
4-14	2.51	1.10	44.59	39.08	25.05	44.52	38.52	21.88	3.22
5-15	2.90	1.28	44.58	39.73	25.63	44.60	38.78	21.74	4.00
6-16	0.85	0.37	44.48	36.46	22.47	44.48	36.69	23.19	0.75
7-17	1.53	0.67	44.45	35.97	22.07	44.49	36.19	23.54	1.48
8-18	1.87	0.82	44.58	35.40	21.69	44.35	36.02	23.78	2.20
9-19	2.30	1.01	44.46	34.78	21.29	44.52	35.47	24.02	2.82
10-20	2.59	1.14	44.66	34.02	20.74	44.49	35.28	24.29	3.77
1-16	0.94	0.41	44.56	37.53	23.42	44.48	36.69	23.19	0.88
2-17	1.59	0.70	44.56	37.90	24.02	44.49	36.19	23.54	1.78
3-18	2.25	0.99	44.56	38.57	24.55	44.35	36.02	23.78	2.67
4-19	2.88	1.27	44.59	39.08	25.05	44.52	35.47	24.02	3.75
5-20	3.50	1.54	44.58	39.73	25.63	44.49	35.28	24.29	4.65
6-11	1.16	0.51	44.48	36.46	22.47	44.36	37.42	22.66	0.98
7-12	1.75	0.77	44.45	35.97	22.07	44.40	37.80	22.45	1.87
8-13	2.25	0.99	44.58	35.40	21.69	44.52	38.07	22.14	2.71
9-14	3.06	1.35	44.46	34.78	21.29	44.52	38.52	21.88	3.78
10-15	3.66	1.61	44.66	34.02	20.74	44.60	38.78	21.74	4.87
1-21	0.76	0.33	44.56	37.53	23.42	44.83	37.20	23.05	0.56
3-23	2.13	0.94	44.56	38.57	24.55	45.46	37.53	23.29	1.86
5-25	3.02	1.33	44.58	39.73	25.63	45.91	37.77	23.53	3.17
7-27	1.01	0.44	44.45	35.97	22.07	44.12	36.44	22.85	0.96
1-26	1.31	0.58	44.56	37.53	23.42	44.29	36.64	22.80	1.11
3-28	2.76	1.21	44.56	38.57	24.55	43.70	36.54	22.60	2.95
5-30	4.37	1.92	44.58	39.73	25.63	43.11	36.00	22.46	5.12
7-22	2.02	0.89	44.45	35.97	22.07	45.07	37.24	23.19	1.80
9-24	3.59	1.58	44.46	34.78	21.29	45.68	37.77	23.45	3.88
9-29	2.33	1.03	44.46	34.78	21.29	43.43	36.17	22.56	2.15
12-22	1.86	0.82	44.40	37.80	22.45	45.07	37.24	23.19	1.15
12-27	1.72	0.76	44.40	37.80	22.45	44.12	36.44	22.85	1.45
14-24	2.78	1.22	44.52	38.52	21.88	45.68	37.77	23.45	2.09
14-29	3.18	1.40	44.52	38.52	21.88	43.43	36.17	22.56	2.67
16-21	1.08	0.48	44.48	36.69	23.19	44.83	37.20	23.05	0.64
18-23	2.71	1.19	44.35	36.02	23.78	45.46	37.53	23.29	1.94
16-26	0.66	0.29	44.48	36.69	23.19	44.29	36.64	22.80	0.43
18-28	2.11	0.93	44.35	36.02	23.78	43.70	36.54	22.60	1.44
20-25	3.78	1.66	44.49	35.28	24.29	45.91	37.77	23.53	2.96
20-30	3.20	1.41	44.49	35.28	24.29	43.11	36.00	22.46	2.40

7. 5 色差観測データによる性能試験結果

性能試験に用いた3種類の色差観測データは、次に示すように判断基準及び観測方法が異なっている。

(a) DUPON-DATASET：基準色差対の色差知覚との一致性、恒常法

(b) ICD-DATASET : 色差知覚の閾値及び許容閾、恒常法

(c) WITT-DATASET : 基準色差対の色差知覚との比率判断、比率評定法

7.2節から7.4節では、色差の差が弁別できるとどうかの弁別閾、色差が知覚（又は許容）されるかどうかの閾値及び色差知覚の大きさの直接評定値というように色差知覚の閾値レベルから閾値上のレベルまでを対象とした色差観測データによる性能試験を行った。従って、性能試験に用いる指標もそれぞれ異なっている。そこで、7.2節から7.4節の結果を比較するために、DATASETごとの性能ランクから色差式の性能を総合的に比較することにする。

表 7.11 3種類の色差観測データによる性能比較結果

データの 種類	CIELAB	CIE94	CIEDE2000	MLAB	CMC	NCDF	NCDF-1	NCDF-2
DUPON	8	2	6	4	7	1	5	3
ICD	3	1	5	4	7	2	6	8
WITT	7	2	3	6	-	3	5	1
総 合	8	1	4	4	(7)	2	6	3

表7.11に3種類の色差観測データごとに知覚色差との一致性に優れている順に付けたランクを示す。CIELABを修正した7種類の色差式は、CIELABと比較して、性能が優れていることを示している。また、CIE94及びNCDFは色差観測データの種類によらずに、色差知覚を良好に予測できる。2000年にCIE94の改良版として提案されたCIEDE2000のランクの低いことが注目される。

色差知覚ではなく色知覚空間の等歩度性をモデルとして改良された均等色空間を用いたNCDFは、CIE94をはじめとする色差観測データを用いて改良された色差式でないにもかかわらず、色差知覚を良好に予測できることを明らかにした。このことは、NCDFが、色知覚レベルで評価されることの多い色彩画像の色再現性の評価に応用できる可能性を示唆している。

また、CIELABやCIE94では、6.3節の計算例に見られるようにマンセル表色系における明度及び彩度が等しく、色相だけが異なる2色の色差に、ゼロでなければならないクロマ差が算定されるという問題が生じる。NCDFからもクロマ差

が算定されるが、その値は無視できるほど十分小さい。NCDFは、この点がCIE94より優位であり、色差知覚の予測だけでなく、マンセル表色系を用いたデータの心理物理的な解析にも用いることができる。

7. 6 結論

均等色差空間を用いた色差式から計算される色差（測色色差）と知覚色差との一致性を検証するために3種類の色差観測データを対象に検討を行った。測色色差と知覚色差との一致性の水準を判断するために、CIELABをはじめとする5種類の色差式の一致性と比較した。その結果、均等色差空間を用いた色差式であるNCDFは、微小な色差の観測によって得られた色差観測データを良好に予測できることを明らかにした。CIEDE2000をはじめとするCIELABの改良色差式の開発は、それぞれが用いた色差観測データを予測するための実験式として進められてきている。このため、新しい色差観測データが得られると、その色差観測データとの不一致性が指摘されるということが繰り返されている。NCDFは、特定の色差観測データによらずに、均等色知覚空間の一つであるマンセル表色系を基本としているところに特徴を持っている。色差知覚の予測だけでなく、マンセル表色系を用いた色知覚データの心理物理的な解析にも用いることができる点で、特定の色差観測データに基づいた色差式より優れている。

参考文献

- 1) R.Berns : Color Res.Appl.,16[5],297(1991)
- 2) CIE TC-1.3 COLORIMETRY : Guidelines for Coordinated Research on Colour Difference Evaluation(1978)
- 3) Publication CIE No.116 Industrial Colour-difference Evaluation(1995)
- 4) Publication CIE No.142 Improvement to Industrial Colour-difference Evaluation(2001)
- 5) F.J.J.Clarke et al : J.Soc.Dyers Colourists,100,128(1984)
- 6) H.Komatsubara : Colour'85(1985)
- 7) 小松原 仁 : 色彩研究,41[1],1(1994)
- 8) JIS Z 8716 表面色の比較に用いる常用光源蛍光ランプ D₆₅ - 形式及び性能 (1991)
- 9) 例えば、J.P.ギルホールド 秋重義治監訳 : 精神測定法 培風館(1959)
- 10) K.Witt : Color Res.Appl.,24[2],199(1991)

第8章 総合結論

製品色の色彩管理に広く利用されている CIELAB 色差式から予測される近似した 2 色の色差と実際に知覚される色差（知覚色差）の間には、不一致が生じている。CIELAB は、我が国で色知覚空間として広く普及しているマンセル表色系の色知覚の相関量を予測するように開発された Adams-Nickerson の色空間を簡便な形に修正したものである。しかし、結果として予測される相関量の等差性に歪みが生じている。この歪みを是正するためにマンセル表色系で隣接する色の色差を CIELAB によって計算し、隣接する色の色差が色座標の位置に関係なく、等しくなるように CIELAB のクロマスケール及び色相スケールを補正した均等色差空間を開発した。この均等色差空間という考え方は、これまでに提案されたことのない新しい概念である。更に、均等色差空間における 2 色の色差を計算するための色差式を提案し、3 種類の色差観測データとの一致性について検討した。その結果、得られた結論は次のとおりである。

(1) 第 4 章では、JIS Z 8721（色の表示方法－三属性による表示）に規定されているマンセル表色系の等色相及び等明度の基準値を用いて、彩度 $C=2$ ステップの色差を計算した結果、色相に依存して彩度 $C=2$ ステップの色差が変化することが明らかになった。色相は赤－黄－緑－青－紫－赤のように循環性があることが知られていることから、色相角による色差の変化を余弦関数の多項式によって近似し、クロマスケールを補正するための補正関数 $F(C)$ （式 4・1）を導出した。

(2) 補正関数 $F(C)$ によって補正したクロマスケールを用いることによって、マンセル表色系の等明度面における等彩度線を、等間隔な同心円として表すことが可能になり、彩度知覚をより良く予測する相関量を与えることを明らかにした。

しかし、マンセル表色系には同心円の中心点と色座標の中心点とが一致しないという無彩色点の偏心が生じていることが見いだされた。色順応効果の予測から、この無彩色点の偏心はマンセル表色系の尺度構成における照度依存性に起因していることを明らかにした。

(3) 第 5 章では、CIELAB クロマスケールを補正し、マンセル表色系の等明度面における隣接する $H=2.5$ ステップの色相間の色差を計算し、クロマで規準化した色差が色相角によって周期的に変動することを明らかにした。クロマによって、色相差が変化するのは、円筒座標系であるマンセル表色系の構造による。この色

相角による変動から、クロマスケールと同様に、余弦関数の多項式を用いた補正関数 $F(H)$ (式 5-1) を導出した。この $F(H)$ から予測されるメトリック色相差の色相角による変動は、無彩色点の偏心の補正方法によってわずかに異なることから、無彩色点の偏心の補正の有無による 3 種類の補正関数 $F(H)$ を与えた。

(4) $F(H)$ を用いて補正したメトリック色相差は、マンセル表色系において色相環に欠落が生じる高彩度領域や明度 $V=1$ のような低明度領域で、色相角による分散が大きくなる。この要因はマンセル表色系の不均等性に起因していることが推定される。しかし、色空間全体としては、色相角依存性は補正されており、メトリック色相差とクロマの相関関係も改善されていることを明らかにした。

(5) 第 6 章では、補正関数 $F(C)$ 及び $F(H)$ を用いて CIELAB のクロマスケール及び色相スケールを補正した色差空間を均等色差空間と定義し、色差属性間の測色色差と色差知覚の違いを補正する重み付け係数 $k(H)$ (式 6-6) 及び $k(C)$ (式 6-7) を用いた色差式 New Color-Difference Formula (NCDF、NCDF-1 及び NCDF-2) を開発した。

(6) 第 7 章では、NCDF、NCDF-1 及び NCDF-2 の有効性を検討するために、5 種類の色差式との性能比較を行った。性能比較は、3 つの色差観測データを用いて、観測された知覚色差との一致性によって検討した。その結果、NCDF は、CIE が 2000 年に暫定勧告した CIEDE2000 より知覚色差を良好に予測し、1994 年に暫定勧告された CIE94 とほぼ同等な性能を有していることを明らかにした。

(7) CIELAB や CIE94 では、マンセル表色系における明度及び彩度が等しく、色相だけが異なる 2 色の色差に、クロマ差が混入するという問題が生じる。NCDF からもクロマ差が算定されるが、その値は無視できるほど十分小さい。NCDF は、この点が CIE94 より優位であることを示した。

(8) NCDF は、CIE94 及び CIEDE2000 のように特定の色差観測データを用いて導出された色差式ではなく、均等色知覚空間として広く認知されているマンセル表色系の等知覚差性に着目したものである。NCDF によって 2 つの色差観測データを良好に予測することができたことから、様々な分野における製品色の色差評価で、色の種類及び色差を構成する色差属性に関係なく、良好な色差知覚の予測値を提供することの可能性が確認された。

(9) 本研究の過程で、マンセル表色系の問題点も幾つか明らかになった。第4章及び第5章のクロマスケール及び色相スケールの検討において、均等色差空間の基本として用いたマンセル表色系の隣接する色票間の等差性が、色相環が欠落する領域（彩度 $C=10$ 以上）において著しく崩れることが見いだされた。また、無彩色点に偏心が生じていることを明らかにした。特に、無彩色点の偏心については、マンセル表色系の彩度 $C=0, C=2, C=4 \dots$ の基準値から三次補間を用いて規定している彩度 $C=1$ 及び $C=3$ の基準値の信頼性についての検討が必要であることを示唆している。また、無彩色点の偏心を補正している NCDF-1 及び NCDF-2 の性能評価にも影響が大きいことが明らかになった。無彩色近傍の低彩度領域の製品色の色差予測に影響が大きいことから、今後、知覚実験を含めた色知覚空間の検討が必要である。

謝辞

本論文を作成にあたり、新潟大学 関根征士教授、菊池久和教授、宮川道夫教授、木竜 徹教授、林 豊彦教授、大河正志教授には、ご多忙にもかかわらず、詳細なご検討とご討論をいただき、また有益なご助言とご指導を賜りましたことを深く感謝いたします。

本研究は、(財)日本色彩研究所の支援により行われた研究から作成されたものである。近江源太郎理事長をはじめ研究所の方々に深謝します。また、研究所における研究の機会を与えていただいた企業、特に、INAX㈱及び関西ペイント㈱の支援に感謝いたします。

本論文のとりまとめを勧められ、かつ長年に渡ってご指導をいただいている川上元郎博士（東京工芸大学名誉教授）に感謝を申し上げます。

本研究に関しては、INAX㈱後藤和昌氏、景山弘一氏、関西ペイント㈱品田登氏の協力により実現できたものであり、以上の方々に深く感謝します。

付録 1

CIE 色差式以外に論文で用いた色差式を次ぎに示す。

1. CIE94 色差式

$$\Delta E^* = \{(\Delta L^*/S_L)^2 + (\Delta C^*/S_C)^2 + (\Delta H^*/S_H)^2\}^{1/2} \quad (1)$$

ここに、 ΔL^* ：2 色の CIE 明度指数 L^* の差

ΔC^* ：2 色の CIELAB のメトリッククロマの差

ΔH^* ：2 色の CIELAB のメトリック色相差式

S_L ：メトリック明度差の重み付け係数で $S_L = 1$

S_C ：式(2)で計算されるメトリッククロマ差の重み付け係数

S_H ：式(3) で計算されるメトリック色相差の重み付け係数

$$S_C = 1 + 0.045 C^* \quad (2)$$

$$S_H = 1 + 0.015 C^* \quad (3)$$

ここに、 C^* ：2 色の CIELAB のメトリッククロマの平均値

2. CIEDE2000 色差式

$$\Delta E^* = \{(\Delta L^*/S_L)^2 + (\Delta C^{*'}/S_C)^2 + (\Delta H^*/S_H)^2 + (R_T(\Delta C^{*'}/S_C)(\Delta H^*/S_H)^2\}^{1/2} \quad (4)$$

ここに、 ΔL^* ：2 色の CIE 明度指数 L^* の差

$\Delta C^{*'}:$ 2 色の CIELAB のメトリッククロマの差。ただし、CIELAB の色座標 a^* を次の色差によって補正して計算する。

$$a' = a^*(1+G)$$

$$\text{ここに、} G = 0.5(1 - (C^{*7}/(C^{*7} + 25^7))^{1/2}$$

ΔH^* ：2 色の CIELAB のメトリック色相差式

S_L ：式(5)で計算されるメトリック明度差の重み付け係数

S_C ：式(6)で計算されるメトリッククロマ差の重み付け係数

S_H ：式(7) で計算されるメトリック色相差の重み付け係数

R_T ：式(9)で計算される青領域だけに適用される重み付け係数

$$S_L = 1 + 0.015(\bar{L}^* - 50)^2 / (20 + (\bar{L}^* - 50))^{1/2} \quad (5)$$

$$S_C = 1 + 0.045 \bar{C}^{*'} \quad (6)$$

$$S_H = 1 + 0.015 \bar{C}^{*'} \times T \quad (7)$$

$$T = 1 - 0.07 \cos(h_{ab} - 30) + 0.24 \cos(2h_{ab}) \\ + 0.32 \cos(3h_{ab} + 6) - 0.20 \cos(4h_{ab} - 63) \quad (8)$$

ここに、 h_{ab} ：2色のCIELABのメトリック色相角の平均値

$$R_T = -\sin(2\Delta\Theta)R_C \quad (9)$$

ここに、 $\Delta\Theta = 30\exp(-(h_{ab} - 275)/25)^2$

$$R_C = 2(C^{*'}^7 / (C^{*'}^7 + 25^7))^{1/2}$$

3. MLLAB 色差式

$$\Delta E^* = \{(\Delta L^*/S_L)^2 + (\Delta C^*/S_C)^2 + (\Delta H^*/S_H)^2\}^{1/2} \quad (10)$$

ここに、 ΔL^* ：2色のCIE明度指数 L^* の差

ΔC^* ：2色のCIELABのメトリッククロマの差

ΔH^* ：2色のCIELABのメトリック色相差

S_L ：メトリック明度差の重み付け係数で $S_L = 1$

S_C ：メトリッククロマ差の重み付け係数 $S_C = 2$

S_H ：メトリック色相差の重み付け係数 $S_H = 4/3$

4. CMC 色差式

$$\Delta E^* = \{(\Delta L^*/S_L)^2 + (\Delta C^*/S_C)^2 + (\Delta H^*/S_H)^2\}^{1/2} \quad (11)$$

ここに、 ΔL^* ：2色のCIE明度指数 L^* の差

ΔC^* ：2色のCIELABのメトリッククロマの差

ΔH^* ：2色のCIELABのメトリック色相差

S_L ：基準色から、式(12)で計算されるメトリック明度差の重み付け係数

S_C ：基準色から、式(13)で計算されるメトリッククロマ差の重み付け係数

S_H ：基準色から、式(14)で計算されるメトリック色相差の重み付け係数

$$S_L = 0.511 \text{ (ただし、} L_1^* < 16 \text{)}$$

$$S_L = 0.040975 L_1^* / (1 + 0.01765 L_1^*) \text{ (ただし、} L_1^* > 16 \text{)} \quad (12)$$

$$S_C = [0.0638 C_1^* / (1 + 0.0131 C_1^*) + 0.638] \quad (13)$$

$$S_H = S_C (T \times f + 1 - f) \quad (14)$$

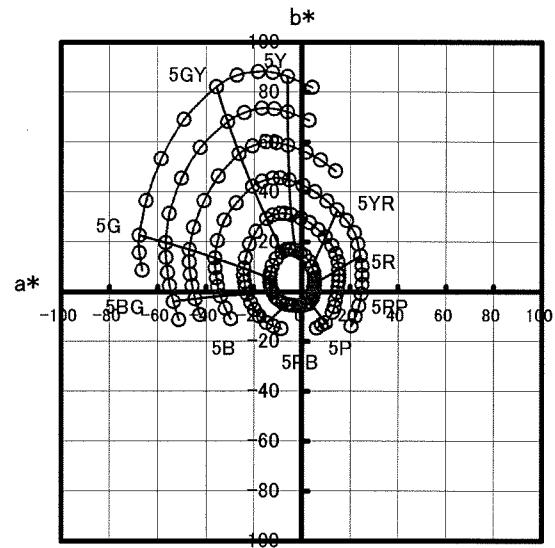
$$\text{ただし, } f = \{(C_1^*)^4 / [(C_1^*)^4 + 1900]\}^{1/2}$$

$$T = 0.56 + |0.2 \cos(h_1 + 168)| \text{ (ただし、} 164^\circ < h_1 < 345^\circ \text{)}$$

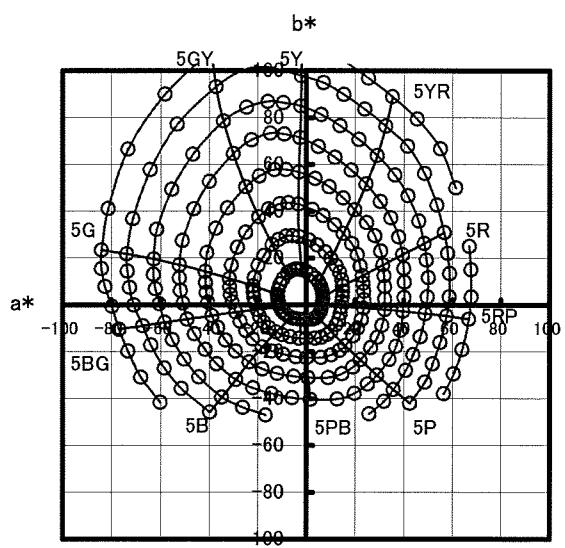
$$T = 0.36 + |0.4 \cos(h_1 + 35)| \text{ (ただし、} h_1 < 164^\circ \text{ 又は } h_1 > 345^\circ \text{)}$$

付録 2

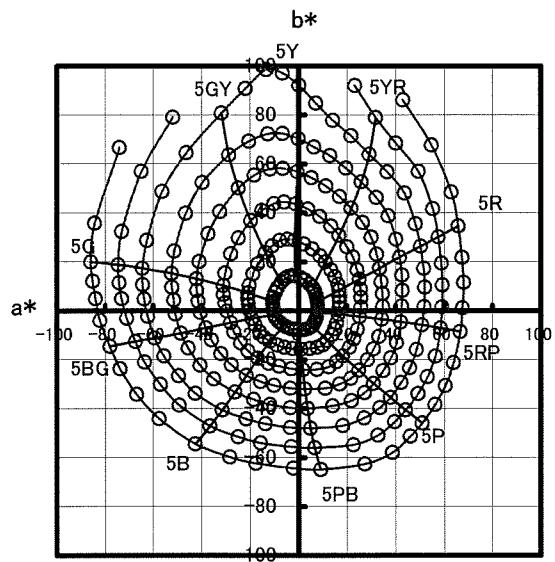
- 付図 1 CIELAB のマンセルグリッド (V = 9)
付図 2 CIELAB のマンセルグリッド (V = 7)
付図 3 CIELAB のマンセルグリッド (V = 5)
付図 4 CIELAB のマンセルグリッド (V = 3)
付図 5 CIELAB のマンセルグリッド (V = 1)
- 付図 6 修正クロマスケールを用いたマンセルグリッド (V = 9)
付図 7 修正クロマスケールを用いたマンセルグリッド (V = 7)
付図 8 修正クロマスケールを用いたマンセルグリッド (V = 5)
付図 9 修正クロマスケールを用いたマンセルグリッド (V = 3)
付図 10 修正クロマスケールを用いたマンセルグリッド (V = 1)
- 付図 11 修正クロマスケールと無彩色点補正 I を用いたマンセルグリッド (V= 9)
付図 12 修正クロマスケールと無彩色点補正 I を用いたマンセルグリッド (V= 7)
付図 13 修正クロマスケールと無彩色点補正 I を用いたマンセルグリッド (V= 5)
付図 14 修正クロマスケールと無彩色点補正 I を用いたマンセルグリッド (V= 3)
付図 15 修正クロマスケールと無彩色点補正 I を用いたマンセルグリッド (V= 1)
- 付図 16 修正クロマスケールと無彩色点補正 II を用いたマンセルグリッド (V= 9)
付図 17 修正クロマスケールと無彩色点補正 II を用いたマンセルグリッド (V= 7)
付図 18 修正クロマスケールと無彩色点補正 II を用いたマンセルグリッド (V= 5)
付図 19 修正クロマスケールと無彩色点補正 II を用いたマンセルグリッド (V= 3)
付図 20 修正クロマスケールと無彩色点補正 II を用いたマンセルグリッド (V= 1)



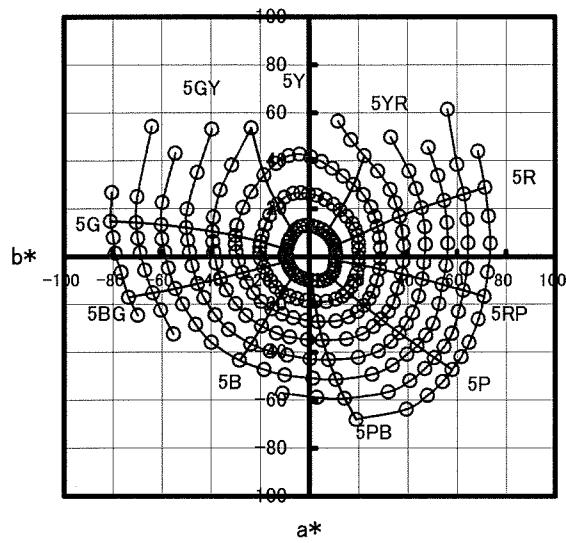
付図 1 CIELAB のマンセルグリッド (V=9)



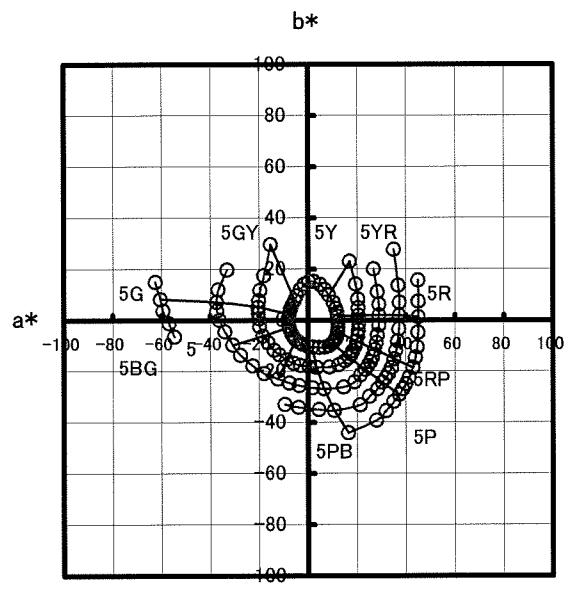
付図 2 CIELAB のマンセルグリッド (V=7)



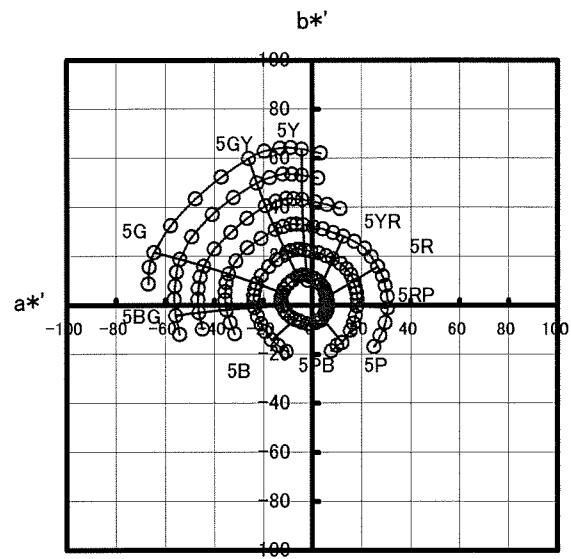
付図3 CIELAB のマンセルグリッド (V=5)



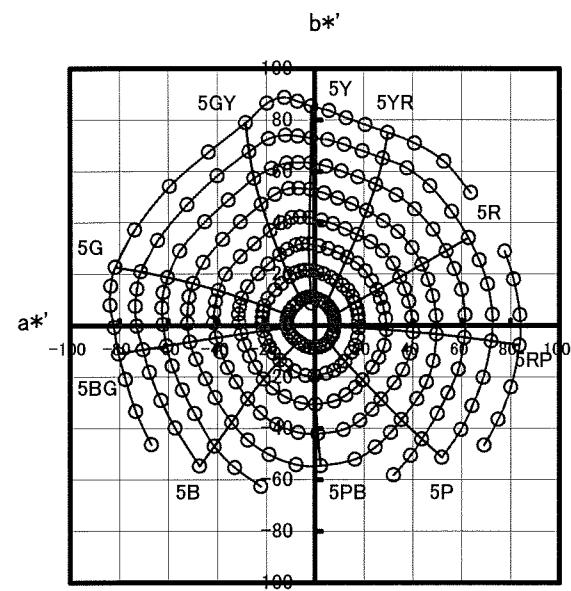
付図4 CIELAB のマンセルグリッド (V=3)



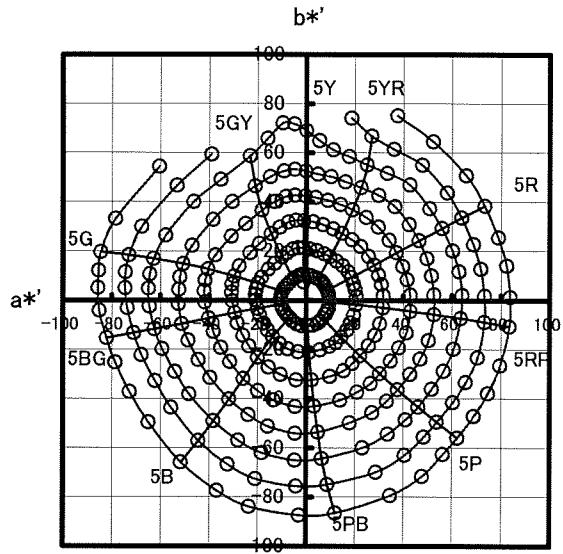
付図 5 CIELAB のマンセルグリッド ($V=1$)



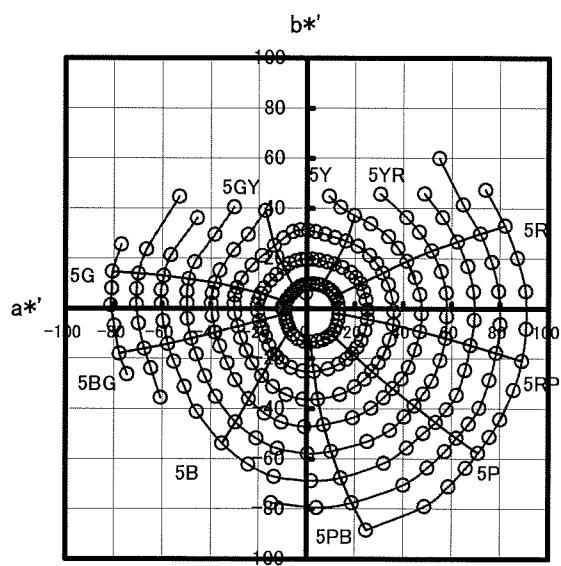
付図 6 修正クロマスケールを用いたマンセルグリッド (V=9)



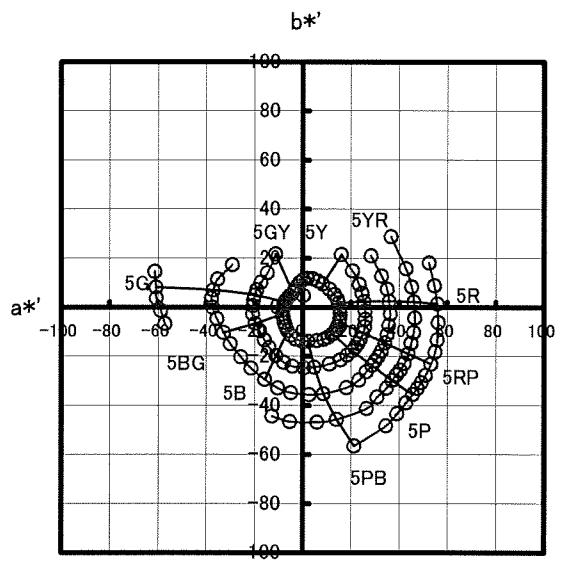
付図 7 修正クロマスケールを用いたマンセルグリッド (V=7)



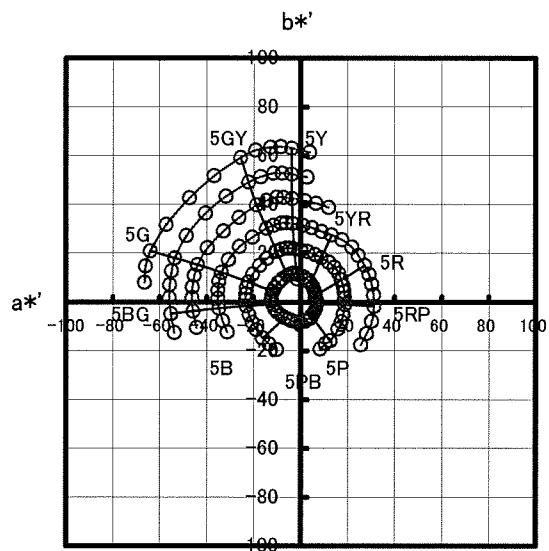
付図 8 修正クロマスケールを用いたマンセルグリッド (V=5)



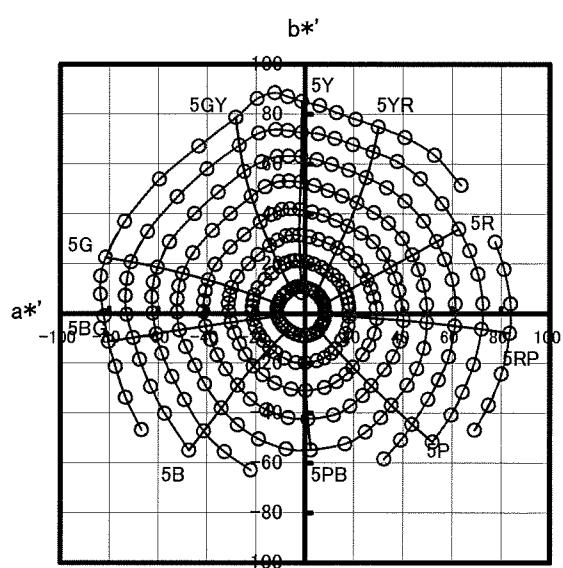
付図 9 修正クロマスケールを用いたマンセルグリッド (V=3)



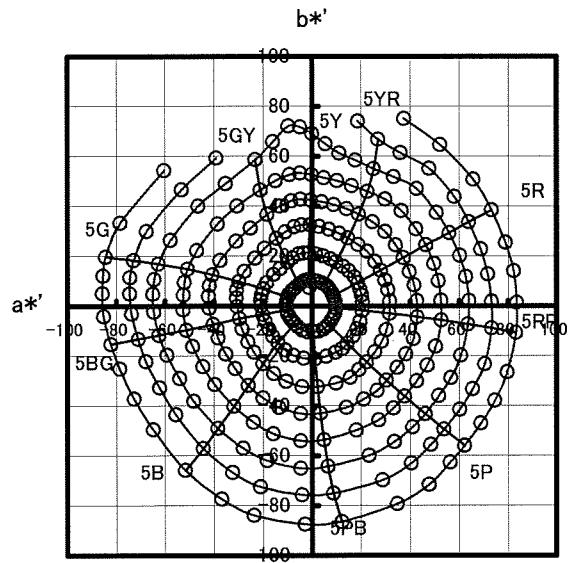
付図 10 修正クロマスケールを用いたマンセルグリッド (V=1)



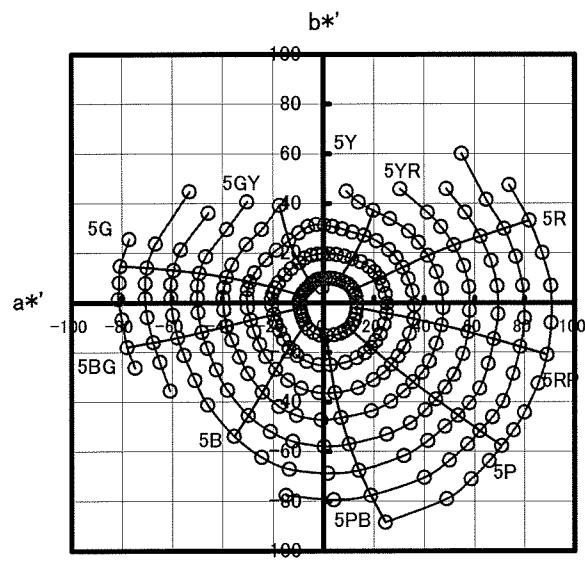
付図 11 修正クロマスケールと無彩色点補正 I を用いたマンセルグリッド (V=9)

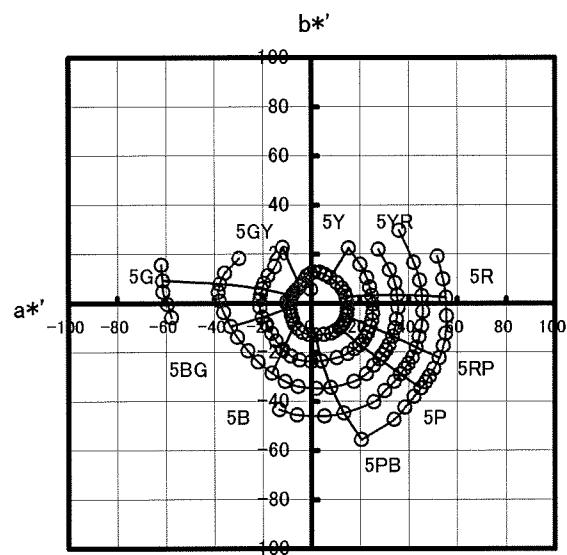


付図 12 修正クロマスケールと無彩色点補正 I を用いたマンセルグリッド (V=7)

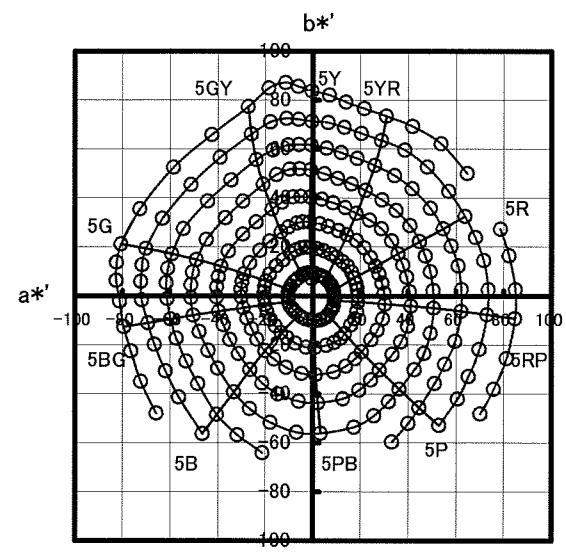
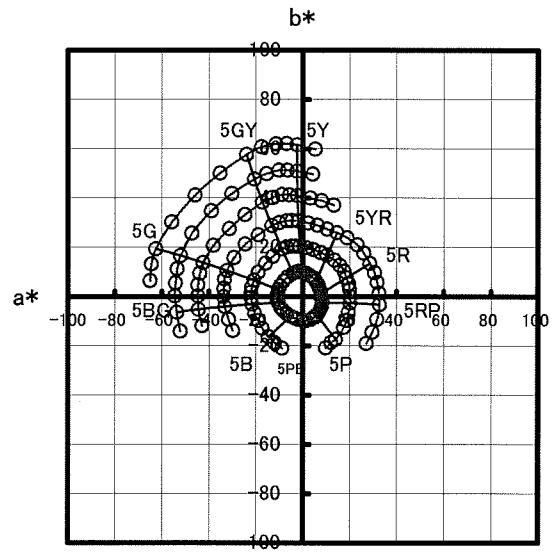


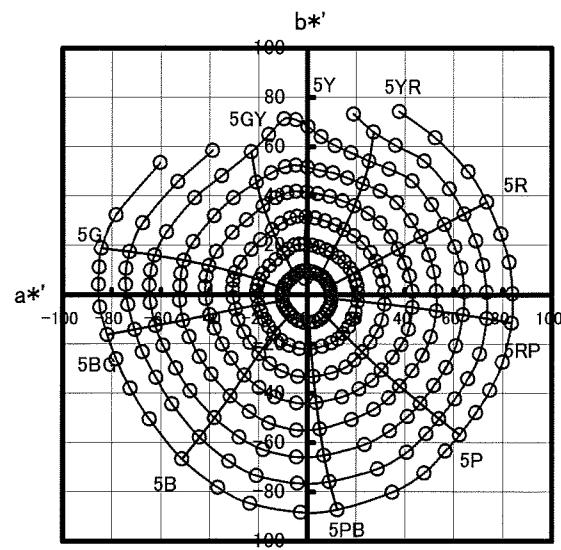
付図 13 修正クロマスケールと無彩色点補正 I を用いたマンセルグリッド (V=5)



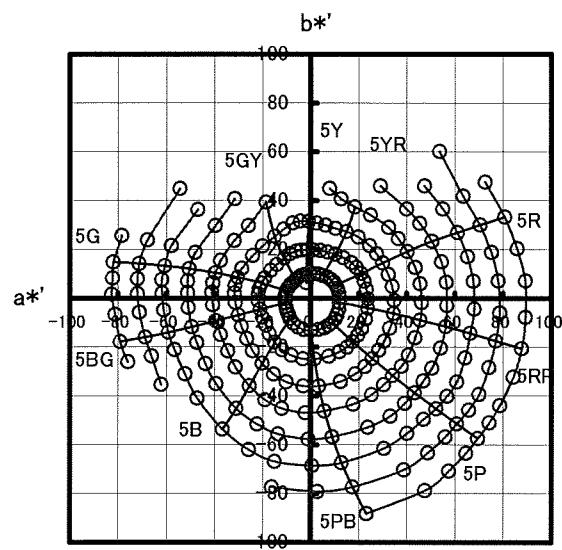


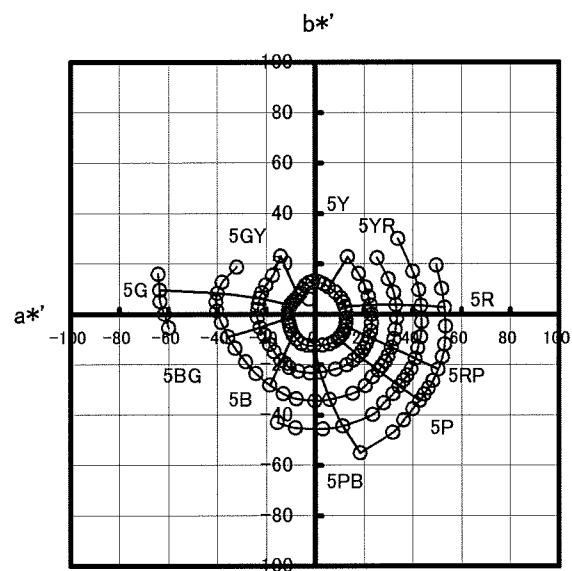
付図 15 修正クロマスケールと無彩色点補正 I を用いたマンセルグリッド (V=1)





付図 18 修正クロマスケールと無彩色点補正 II を用いたマンセルグリッド (V=5)





付図 20 修正クロマスケールと無彩色点補正 II を用いたマンセルグリッド ($V=1$)